

Université de Montréal

**L'estimation des impacts canadiens des changements climatiques : une
évaluation du modèle FUND.**

Département de Sciences Économiques
Faculté des Arts et Sciences

Rapport de recherche présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Maîtrise
en Sciences Économiques

par
Alexandre Drzymala
sous la direction de
M. Gérard Gaudet
et
M. Michel Poitevin

Août, 2009

© Alexandre Drzymala, 2009

Table des matières

1. Introduction	4
2. Le modèle FUND	6
4. Analyse du module économique	18
4.1. L'agriculture	19
4.2. La foresterie	24
4.3. Les ressources en eau	26
4.4. La consommation d'énergie	28
4.5. L'élévation du niveau de la mer	30
4.6. Les écosystèmes	31
4.7. La santé humaine	33
4.8. Les phénomènes météorologiques extrêmes	34
5. Calcul et évaluation des résultats	36
5.1. Méthodologie des calculs	36
5.2. Résultats	37
5.3. Sensibilité des impacts	40
5.3.1. La population	41
5.3.2. Le produit intérieur brut	42
5.3.3. La température	43
5.3.4. La concentration de CO ₂ et l'amélioration de l'efficacité énergétique autonome	43
6. Les stratégies d'atténuation des dommages	44
6.1. Les 2 types d'interventions publiques	44
6.2. Les traités internationaux et le problème du resquillage	47
7. L'équité intergénérationnelle dans le contexte des changements climatiques	49
7.1. Présentation de l'enjeu et des points de vue	51
8. Évaluation critique	54
8.1. La situation canadienne dans le modèle FUND	54
8.2. La modélisation de l'adaptation dans le modèle FUND	55
8.3. L'analyse coûts-bénéfices appliquée aux changements climatiques	56
9. Conclusion	58
Annexes	59
Annexe 1 : Régions et pays du modèle FUND	59
Annexe 2 : Description des scénarios socio-économiques du modèle FUND	60
Annexe 3 : Représentation graphique du module climatique du modèle FUND	61
Annexe 4 : Impacts régionaux canadiens des changements climatiques	62
Annexe 5 Illustrations graphiques des principales variables intrants du modèle FUND	64
Annexe 5.1 : Projections du produit intérieur brut canadien	64
Annexe 5.2 : Projections de la population canadienne	64
Annexe 5.3 : Projections du changement du climat	65
Annexe 6 : Illustrations graphiques des impacts canadiens des changements climatiques	66
Annexe 6.1 : L'agriculture	66
Annexe 6.2 : La foresterie	66
Annexe 6.3 : Les ressources en eau	67

Annexe 6.4 : La consommation d'énergie	67
Annexe 6.5 : Les écosystèmes	68
Annexe 6.6 : Les phénomènes météorologiques extrêmes	68
Bibliographie	69

1. Introduction

Les problèmes environnementaux causés par la consommation d'énergie par l'économie mondiale de l'ère moderne préoccupent de plus en plus les sociétés. Parmi ceux-ci, le réchauffement climatique constitue probablement la menace la plus complexe. Dans la communauté scientifique, il existe un consensus selon lequel l'accélération du réchauffement de la planète est en majeure partie associée à l'émission de gaz effet de serre (GES) résultant de l'activité humaine.¹ Les changements climatiques observés et projetés incluent des niveaux de températures moyennes plus élevés, des vagues de chaleurs et des précipitations plus fréquentes et intenses, davantage de sécheresses, une augmentation du niveau de la mer, ainsi que davantage d'événements liés aux aléas naturels tels que cyclones, ouragans et tempêtes.² Ces changements affectent les économies de la planète de plusieurs manières à travers le temps et l'espace.

L'économie canadienne n'est pas épargnée. Les changements qu'elle subit dans ses divers secteurs économiques, dans ses échanges commerciaux et dans ses rapports internationaux affecteront le bien-être des citoyens canadiens. Certains changements impliquent des coûts tandis que d'autres engendrent des bénéfices. Dans le but d'orienter les politiques publiques pour minimiser les coûts et tirer profit des opportunités des impacts des changements climatiques, le gouvernement fédéral et les différentes institutions provinciales travaillent présentement à cerner les principales sphères économiques vulnérables aux changements climatiques et à examiner plus en profondeur comment les changements climatiques les affecteront. Ces recherches permettent aux experts de différents milieux de construire des modèles combinant des projections climatiques et économiques capables d'estimer les coûts et bénéfices pour les différentes régions canadiennes à travers le temps. Les estimations représentent de l'information utile pour les décideurs politiques afin d'établir des plans d'action et de les orienter de manière efficace.

¹ Voir le rapport *Les bases scientifiques et physiques* contenu dans le *Quatrième rapport d'évaluation du GIEC*.

² Idem

Il existe plusieurs modèles conçus pour estimer les impacts des changements climatiques au niveau global et régional. La majorité de ces modèles sont communément surnommés « modèles d'évaluation intégrés »³ en raison des multiples disciplines auxquelles ils font appel, telles que les sciences sociales, environnementales et économiques, ainsi que les dimensions institutionnelles des problèmes qu'ils traitent. Ils regroupent tous des projections climatiques et économiques d'une ou de plusieurs régions du monde pour en dériver les impacts susceptibles de se produire et estiment ces impacts en termes monétaires avec des équations communément appelées « fonctions de dommage » (les dommages négatifs représentent des bénéfices). Le nombre de secteurs économiques évalués, le niveau de détail inclus dans chaque secteur et le traitement de l'incertitude varient considérablement d'un modèle à l'autre. Enfin, les valeurs des résultats issus du calcul des fonctions de dommage diffèrent dans leur échelle et parfois même dans leur signe.

La présente recherche se veut une analyse de l'un de ces modèles d'évaluation intégrés, *The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND)*.⁴ La recherche vise à identifier et à discuter des différentes notions économiques applicables à l'enjeu des changements climatiques dans le contexte canadien, et à rendre compte de celles qui ont été considérées dans le modèle FUND. La recherche permet aussi d'évaluer les défis à intégrer ces notions dans un modèle d'analyse coûts-bénéfices. Les discussions de la recherche se divisent en six parties. Tout d'abord, une revue de la littérature tente de cerner les principales sphères économiques canadiennes dans lesquelles les experts des milieux scientifique et économique projettent des impacts liés aux changements climatiques et d'évaluer dans quelles mesures ces sphères sont couvertes par le modèle FUND. Une évaluation des composantes des fonctions de dommage, combinée à une revue des études sur lesquelles se base le choix des paramètres des fonctions, permet ensuite de déterminer les principales variables climatiques et économiques du modèle qui

³ Le rôle des modèles d'évaluation intégrés développés dans l'évaluation des défis économiques et le traitement des incertitudes liés aux changements climatiques sont davantage expliqués dans l'article de Kelly et Kolstad : <http://www.cepe.ethz.ch/education/EnergyPolicy/wp31-98.pdf>

⁴ Voir le site Internet sur le modèle FUND. Lien HTML : <http://www.fnu.zmaw.de/FUND.5679.0.html>

affectent les impacts pour le Canada. Subséquemment, une analyse des résultats et de leur sensibilité par rapport aux principales variables intrants fournit de l'information sur le degré d'importance des tendances économiques, technologiques et environnementales canadiennes sur les résultats. Suivra une revue des principaux types de plans d'action possible en réaction aux menaces et opportunités des changements climatiques, en mettant l'accent sur leurs principales caractéristiques et leurs effets sur les impacts anticipés. Il sera ensuite question de l'enjeu d'équité intergénérationnelle dans le cadre de l'application d'une analyse coûts-bénéfices et de ses implications dans la détermination du taux d'actualisation utilisé. Enfin, une analyse critique traitera de la capacité du modèle FUND à tenir compte des principaux aspects des changements climatiques reliés au Canada.

Une présentation du modèle utilisé est cependant un préalable pour discuter des six parties mentionnées.

2. Le modèle FUND

FUND est développé par l'économiste et scientifique Richard S.J. Tol. Il évalue les coûts et les bénéfices des changements climatiques de 16 régions du monde de 1950 à 2300. Le modèle est couramment utilisé pour faire des analyses coûts-bénéfices de réductions d'émissions de gaz à effet de serre et pour évaluer les questions d'équité des politiques de changements climatiques. Le tableau de l'Annexe 1 énumère ces régions et les pays constituant chacune d'elles. Le modèle comporte un module climatique et un module économique qui visent à estimer respectivement les changements de températures et les impacts qui en résultent en utilisant des projections sur plusieurs variables climatiques, économiques et technologiques déterminantes. Les projections utilisées dans le modèle se basent sur les scénarios développés par le *Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC)*,⁵ un organisme des Nations Unis chargé d'examiner le phénomène des changements climatiques à travers le monde et de développer des connaissances scientifiques et économiques sur les enjeux reliés aux impacts qu'il

⁵ *Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC)*, Troisième rapport d'évaluation du GIEC, lien HTML : <http://www.ipcc.ch/>

engendre. Chaque scénario représente une évolution différente des sphères sociales, économiques et politiques du monde. Les projections quantitatives construites dans le modèle FUND sont basées sur les scénarios A1B, A2, B1 et B2 du *GIEC*. Les scénarios comportant la lettre A sont plus axés sur une croissance économique rapide, tandis que les scénarios comportant la lettre B sont davantage axés sur la protection et la durabilité de l'environnement. Les scénarios comportant le chiffre 1 mettent l'accent sur un développement économique global et une meilleure distribution de la richesse, alors que les scénarios comportant le chiffre 2 mettent l'accent sur un développement économique régionalisé et hétérogène. L'Annexe 2 comporte une description détaillée de chacun de ces scénarios.

Le module climatique est constitué d'équations scientifiques faisant appel aux sciences de l'atmosphère et de l'océan. La présente étude étant axée sur le volet économique des changements climatiques, une compréhension approfondie des notions scientifiques sous-tendant les équations n'est pas nécessaire. Cependant, il est important de saisir les principales relations entre les émissions de gaz à effet de serre et les changements de températures projetés. Le module utilise les projections sur la population, le revenu par habitant, l'efficacité énergétique et l'intensité carbonique pour estimer les émissions des différents gaz à effet de serre du Canada sous les quatre scénarios. Ces émissions sont ensuite converties en concentrations atmosphériques en calculant les cycles de vie de chaque gaz à effet de serre, ainsi que leur taux de dégradation. Le forçage radiatif de l'atmosphère est calculé à l'aide des concentrations atmosphériques des différents GES et les changements de température pour chaque niveau de forçage radiatif sont finalement estimés. Des politiques peuvent être mises en place pour les émissions de certains GES et quelques équations du module servent à estimer les coûts de ces réductions d'émissions. L'Annexe 3 comporte un diagramme illustrant les principaux liens entre les émissions, les concentrations et les températures estimées.

Le module économique comporte les fonctions de dommage utilisées pour estimer les impacts monétaires des changements climatiques. Le modèle FUND comporte huit

sections distinctes correspondant à des « domaines »⁶ économiques. Les impacts causés dans ces domaines sont évalués sous différentes formes. Les impacts évalués sont soit des conséquences de variations de production et/ou productivité d'industries, soit des dommages causés à des infrastructures et des terres, soit des variations dans les taux de décès, soit des variations dans les valeurs estimées d'actifs environnementaux ou des variations dans les demandes de marchés. Les domaines étudiés de FUND sont l'agriculture, la foresterie, les ressources en eau, la consommation d'énergie, l'élévation du niveau de la mer, les écosystèmes, la santé humaine et les phénomènes météorologiques extrêmes.⁷

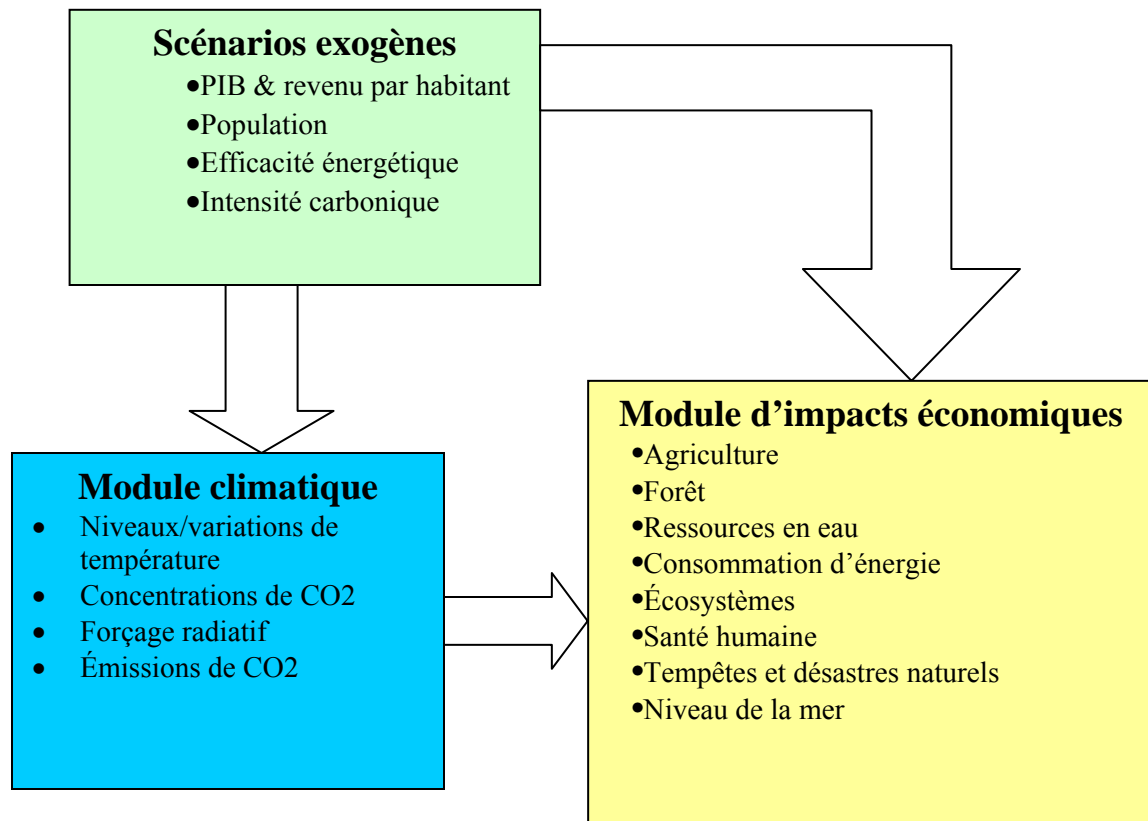
FUND est un modèle « global ». Un modèle global conçu pour estimer les impacts des changements climatiques peut parfois désagréger les résultats et les répartir à différentes régions du monde. Une telle démarche est possible en utilisant des poids différents dans les fonctions de dommage selon la région étudiée.⁸ Les fonctions de dommage du modèle des domaines de FUND ont les mêmes formes fonctionnelles et les mêmes intrants pour toutes les régions étudiées. La composante des équations qui distingue les régions sont les paramètres utilisés. Bien que le niveau de détail de ce modèle ne permet pas de couvrir la totalité des aspects économiques des changements climatiques et de leurs synergies au niveau national, le Canada est considéré à lui seul comme l'une des 16 régions étudiées. La région du Canada possède donc des paramètres qui lui sont propres. Le Diagramme 1, à la prochaine page, illustre la structure générale du modèle.

⁶ Le terme « domaine » est utilisé en raison de la multiple nature des termes utilisés pour désigner un groupe d'impact spécifique. Les domaines comprennent des secteurs d'activités, des phénomènes naturels, ainsi que des ressources naturelles et écologiques.

⁷ Voir la description technique du modèle FUND sur le site Internet du modèle. Liens html:
<http://www.fnu.zmaw.de/fileadmin/fnu-files/staff/tol/FundTechnicalDescription.pdf>

⁸ Voir Warren et al. (2006), p. 3-5

Diagramme 1



3. Revue de la littérature

Cette partie présente une revue de la littérature traitant des impacts des changements climatiques au Canada en se basant sur les travaux de recherche effectués au niveau national. Ceci permettra de cerner les principaux domaines de l'économie canadienne dans lesquels les changements climatiques auront des impacts majeurs. Par la suite, une évaluation des domaines couverts par le modèle FUND permet de juger dans quelles mesures ce dernier cible les domaines canadiens traités dans la littérature.

Durant les dix dernières années, de nombreux travaux de recherche dans le domaine des impacts des changements climatiques à l'échelle canadienne ont été effectués. Ces travaux déterminent les domaines de l'économie canadienne les plus susceptibles d'être affectés par le phénomène du changement climatique, leur degré de vulnérabilité ainsi que leurs capacités d'adaptation. De plus, ils traitent des particularités des impacts à travers les régions du Canada, procurant ainsi une dimension régionale à l'analyse de chaque domaine. Dans l'optique d'avoir une vue d'ensemble des principaux domaines canadiens traités dans la littérature, la présente revue compile l'information contenue dans les trois principaux rapports canadiens effectués sur le sujet. Ces rapports réunissent les connaissances acquises dans les recherches effectuées par une gamme de scientifiques et d'économistes spécialisés dans le domaine des changements climatiques à l'échelle canadienne. Ils présentent en quelque sorte des synthèses des recherches détaillées faites dans un domaine particulier, dans un secteur économique précis ou dans une région canadienne spécifique. Ces études n'évaluent cependant pas empiriquement les impacts.

Le premier rapport a été publié en 1998 et est intitulée *Étude pancanadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique*. Le rapport identifie onze domaines dans lesquels les changements climatiques auront des impacts significatifs et les mesures d'adaptation possibles pour chacun des domaines. Ces domaines comprennent l'eau, les écosystèmes, l'agriculture, les pêches, les forêts, l'énergie, le transport, le milieu bâti, le marché de l'assurance, la santé humaine ainsi que les loisirs et le tourisme. Les auteurs soulignent qu'ils se sont « relativement peu attachés à examiner

en détail les impacts positifs ou les avantages possibles du changement climatique ».⁹ Il est important de tenir compte de cette information dans la présente analyse. La Figure 1, à la fin de cette section, contient l'information essentielle incluse dans les onze domaines couverts par le rapport.

Le deuxième rapport de recherche a été publié en 2004 et s'intitule *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne*.¹⁰ Il comporte une description détaillée des impacts des changements climatiques dans sept domaines : les ressources en eau, l'agriculture, la foresterie, les pêches, les zones côtières, les transports, ainsi que la santé et le bien-être humain. Bien que ce rapport divise le contenu par domaine comme le premier rapport, les auteurs prennent soin de mentionner que « ces [domaines] sont à la fois interreliés et interdépendants ». Le Tableau 1, à la fin de cette section, résume l'information du second rapport.

Le dernier rapport a été publié en 2007 et s'intitule *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*. Contrairement aux deux premiers, ce rapport regroupe les impacts canadiens des changements climatiques dans six régions canadiennes, soit le Nord, l'Atlantique, le Québec, l'Ontario, les Prairies et la Colombie-Britannique. Le Tableau 2, à la fin de cette section, indique les domaines vulnérables aux changements climatiques de chacune de ces régions du rapport. Les impacts identifiés dans le rapport de 2007 sont pour la majorité similaires au contenu des deux rapports précédents. Pour cette raison, la description sommaire des impacts les plus importants de chaque région du rapport est reportée au tableau de l'Annexe 4.

Les effets du réchauffement climatique sur les niveaux de température, les fréquences et les intensités des précipitations, le nombre de tempêtes ou de désastres naturels, le niveau de la mer et les courants d'air provoqueront des transformations dans les milieux naturels et bâtis. La revue des trois rapports permet de cerner les principales caractéristiques des impacts des changements climatiques causés par ces transformations dans le cadre

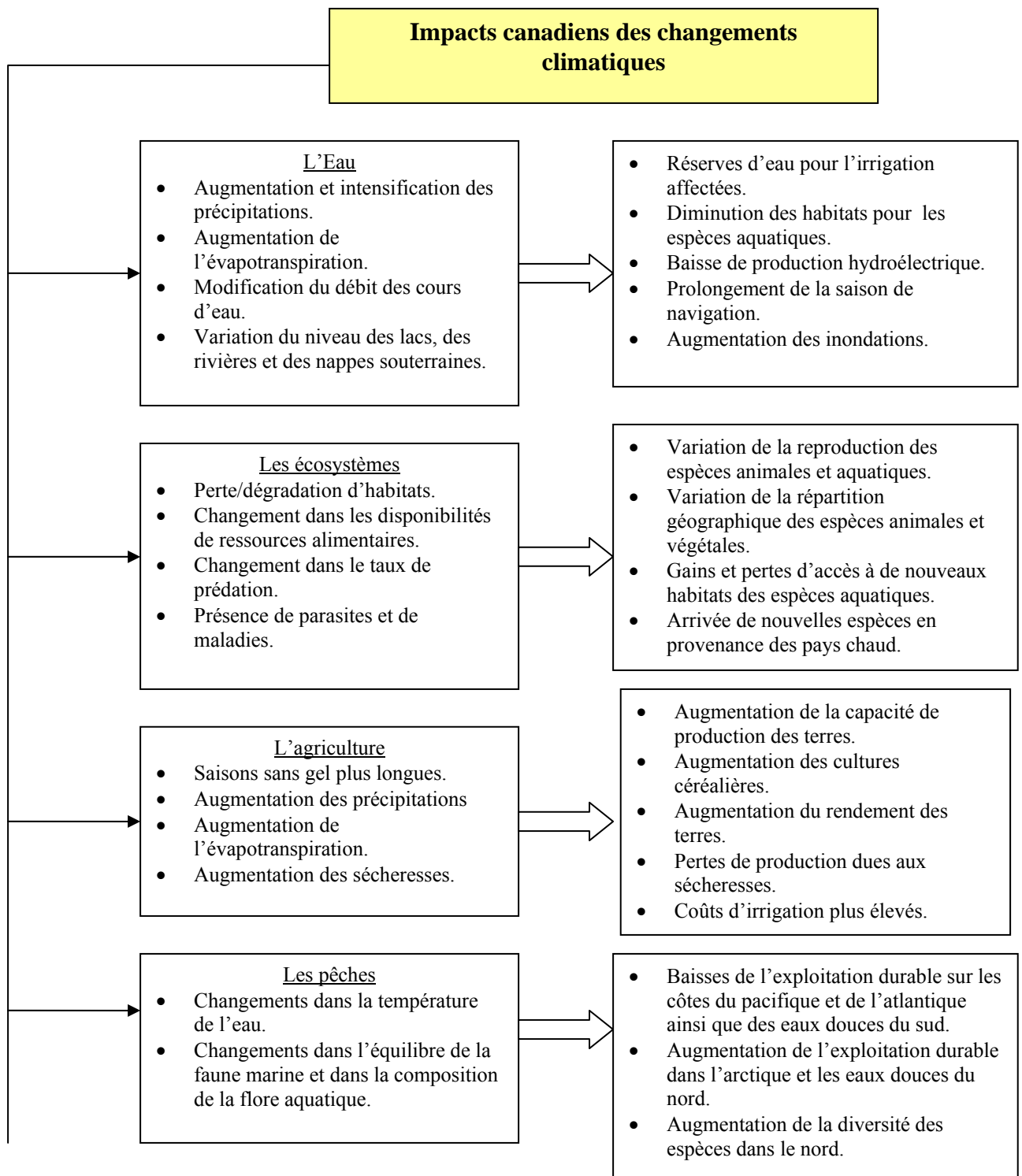
⁹Voir l'*Étude pancanadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique*, p. xiv.

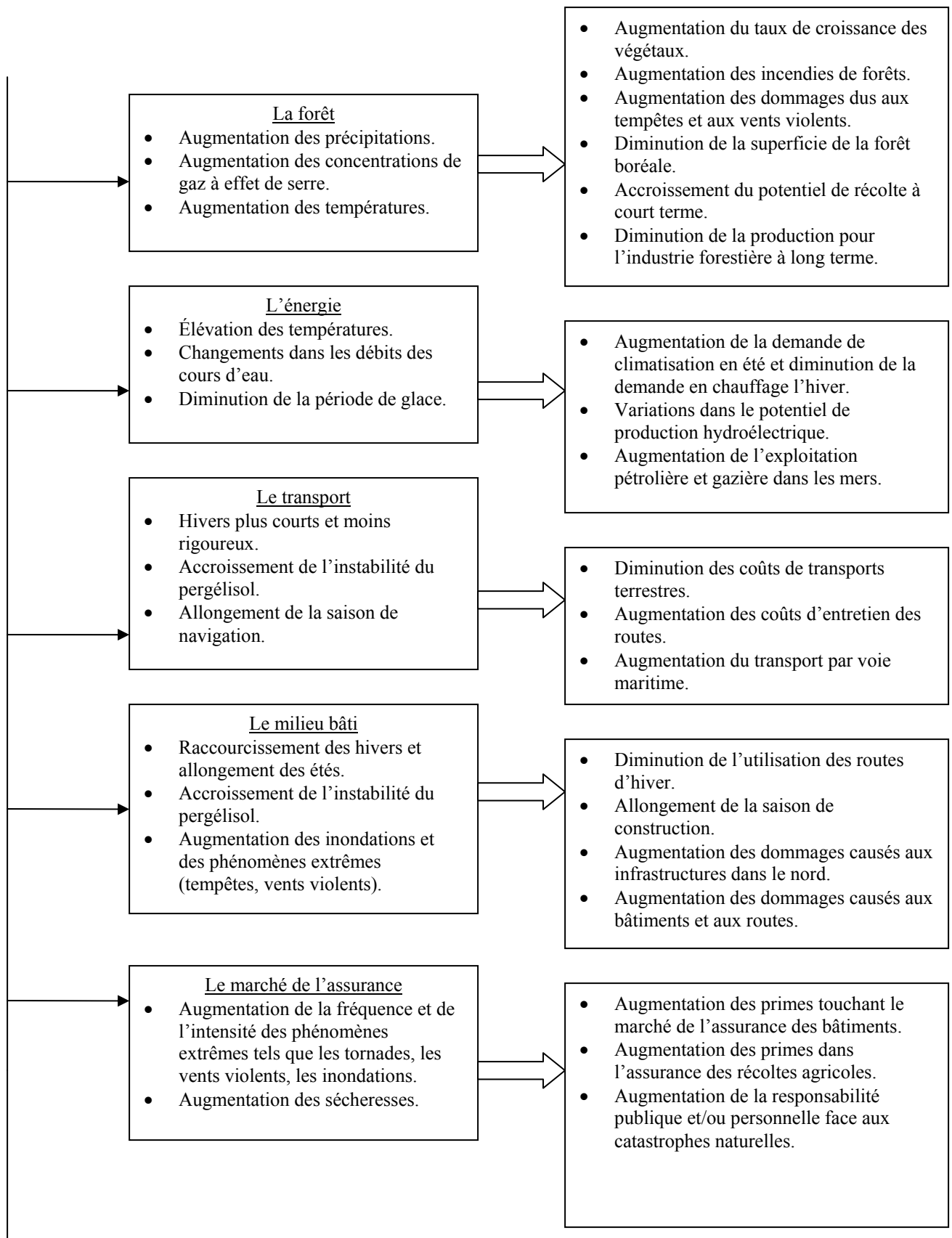
¹⁰ Voir Lemmen et Warren (2004), p. ix.

canadien. Les impacts affectent plusieurs domaines de l'économie canadienne et ceux-ci sont parfois très interdépendants; un impact dans un domaine peut engendrer des pertes ou des bénéfices énormes dans d'autres domaines. De plus, la nature des impacts projetés varie considérablement d'une région canadienne à l'autre.

Le module économique de FUND évalue les impacts canadiens des changements climatiques dans les domaines de l'agriculture, de la foresterie, de la consommation d'énergie, de l'élévation du niveau de la mer, des écosystèmes, de la santé humaine et des phénomènes météorologiques extrêmes. Il est donc important de souligner que le modèle ne tient pas compte des impacts des changements climatiques de plusieurs domaines identifiés dans les rapports canadiens tels que les pêches, le tourisme, les mines, le transport, la production d'énergie (incluant l'hydroélectricité), les parcs et les zones protégés, les collectivités, ainsi que les infrastructures. Cependant, cette observation doit être considérée avec prudence. Plusieurs impacts inclus dans les domaines non couverts par FUND peuvent être incorporés dans les fonctions de dommage de certains domaines de FUND. Par exemple, le domaine des phénomènes extrêmes de FUND comporte des équations estimant les dommages matériels et les changements dans les taux de mortalité causés par les tempêtes. Ces impacts peuvent donc couvrir certains aspects des impacts projetés de la littérature canadienne dans les domaines des infrastructures et des collectivités.

Figure 1 : Étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique.





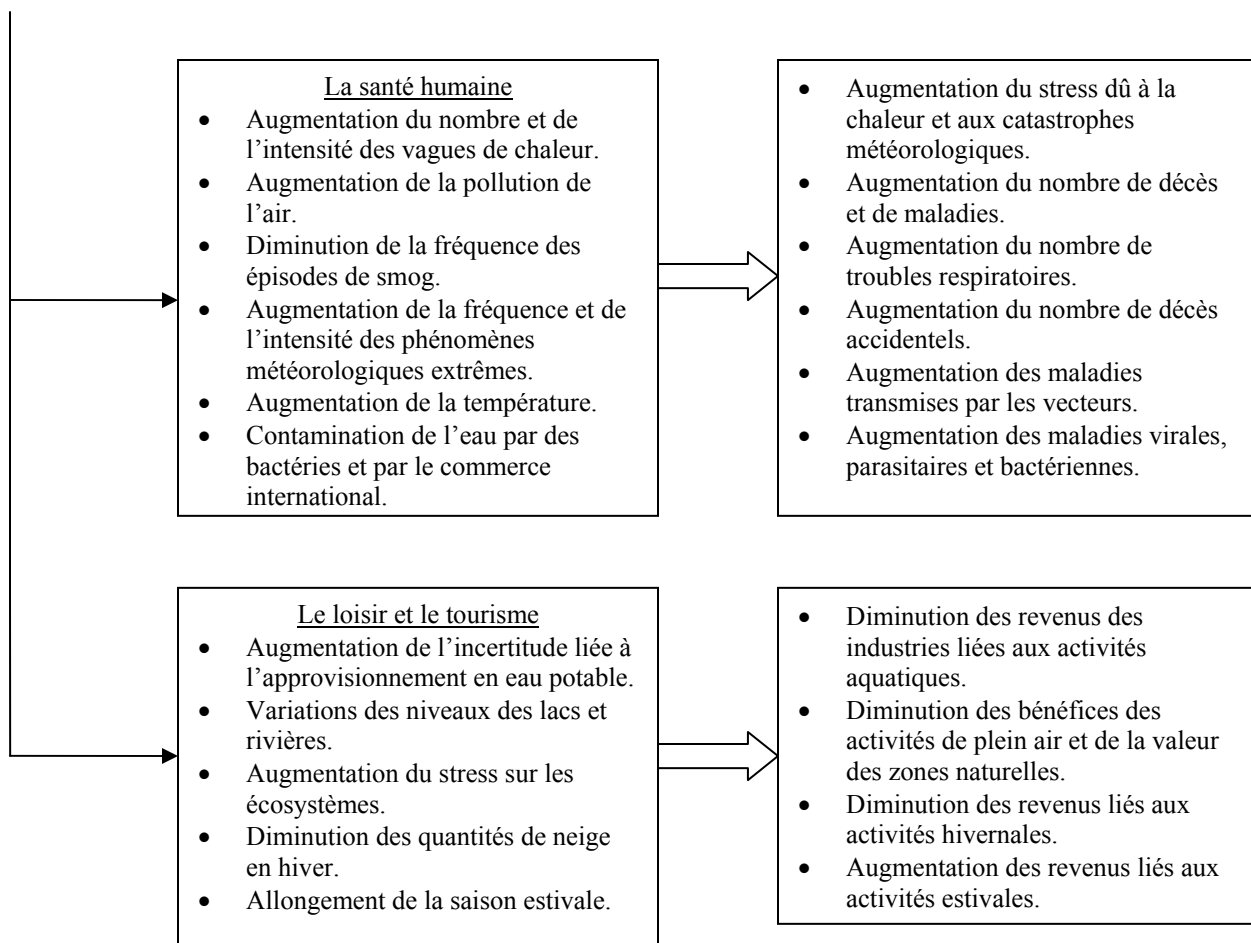


Tableau 1 : *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne*

Domaines	Impacts canadiens des changements climatiques
Les ressources en eau	<ul style="list-style-type: none"> • Les changements dans les cycles hydrologiques provoqueront plus d'incertitude dans l'approvisionnement en eau, particulièrement en été dans les prairies. • La hausse de température pourrait accroître la contamination de l'eau par des bactéries ou des métaux. • L'invasion de l'eau salée dans les régions côtières affecterait les bassins d'eau douce. • La détérioration du pergélisol affecterait l'infrastructure hydraulique du Nord. • Les écarts entre l'offre et la demande en eau potable se multiplieront et affecteront les industries dépendantes de la ressource.
L'agriculture	<ul style="list-style-type: none"> • Le prolongement de la saison de croissance des cultures augmentera la production. • Les stress hydriques affecteront les coûts de production. • Le rendement de certaines cultures pourrait augmenter alors qu'il pourrait diminuer dans d'autres cas.

	<ul style="list-style-type: none"> • La fréquence et l'intensité des événements extrêmes tels que les sécheresses augmenteront le niveau d'incertitude des revenus des producteurs. • La réduction du stress des cultures liées au froid nocturne sera bénéfique.
La foresterie	<ul style="list-style-type: none"> • Les saisons de croissance des végétaux seront prolongées. • L'augmentation des précipitations affectera positivement le taux de croissance des végétaux. • Les concentrations de CO₂ plus élevées affecteront positivement la croissance des forêts. • L'augmentation des feux de forêts affectera à la baisse les superficies des forêts. • L'instabilité des écosystèmes changera la composition florale des forêts. • La prolifération des insectes nuira à la croissance de certaines zones forestières. • Le réchauffement déplacera la limite des arbres plus haut en altitude et en latitude.
Les pêches	<ul style="list-style-type: none"> • Les variations de température des eaux influenceront les taux de reproduction des différentes espèces marines. • L'apparition plus fréquente d'algues toxiques pourrait nuire aux populations de mollusques et de crustacés. • La réduction de la glace de mer affectera la productivité marine de l'arctique et la répartition des espèces se modifiera. • L'ouverture du passage du Nord-Ouest à la navigation présente de nouvelles opportunités pour l'industrie. • La réduction des niveaux des eaux douces pourrait affecter négativement certaines espèces de poissons.
Les zones côtières	<ul style="list-style-type: none"> • La hausse du niveau de la mer engendrera des inondations dans les communautés situées sur les côtes et des dommages aux infrastructures côtières. • La hausse du niveau de la mer accélérera l'érosion des côtes et l'introduction de l'eau salée dans les aquifères côtiers. • Les zones industrielles et les terres agricoles situées près des côtes seront affectées par le niveau de la mer plus élevé. • La baisse des niveaux d'eaux dans les Grands Lacs ferait diminuer le nombre d'inondations des communautés limitrophes. • Un niveau de la mer plus élevé engendrera une perte de propriétés accrue. • Le prolongement de la saison sans glace augmentera la navigation commerciale.
Les transports	<ul style="list-style-type: none"> • La hausse des températures estivales causera des dommages aux chaussées et aux chemins de fer. • Les hivers plus doux diminueront la détérioration des chaussées causée par les cycles de gel et de dégel. • Les précipitations plus fréquentes et plus intenses endommageront les ponts et les autoroutes, particulièrement dans les régions où les pluies sont acides. • Le transport dans le nord du Canada sera moins coûteux. • Les routes de glace utilisées en hiver seront moins efficaces. • Les niveaux d'eau plus élevés affecteront négativement l'infrastructure du transport.
La santé humaine et le bien-être	<ul style="list-style-type: none"> • Les chaleurs plus intenses durant les étés augmenteront les maladies liées à la chaleur et exacerberont les troubles des systèmes circulatoire, respiratoire et nerveux. • La mortalité attribuée au froid diminuerait considérablement. • Les hausses de températures augmenteraient les épisodes de smog et causeraient davantage de troubles de l'asthme. • Les pluies plus abondantes et plus fortes augmenteront le transport des bactéries et des substances toxiques vers les voies d'eau. • Les températures plus chaudes augmenteront la prolifération de maladies à transmission vectorielle. • L'augmentation des phénomènes extrêmes et des catastrophes naturelles causera des stress psychologiques et davantage de morts accidentelles.

Tableau 2 : Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007

Domaines	Régions canadiennes					
	Nord	Atlantique	Québec	Ontario	Prairies	Colombie-britannique
hydroélectricité	x		x			
Mines	x			x		
Infrastructures	x					x
Transports	x	x	x	x	x	x
Foresterie	x	x	x	x	x	x
Pêches	x	x				x
Écosystèmes	x	x		x	x	x
Tourisme	x	x	x	x	x	x
Zones côtières		x				x
Ressources en eau		x	x	x	x	x
Agriculture		x	x	x	x	x
Énergie	x	x		x	x	x
Collectivités		x			x	
Santé humaine				x	x	x
Parcs et zones protégés	x					x

4. Analyse du module économique

Cette partie examine les fonctions de dommage du modèle. Une discussion du choix des paramètres des fonctions de dommage de FUND permet d'identifier de manière plus précise les aspects des impacts évalués. Une analyse des formes fonctionnelles aborde par la suite les types de relations entre les variables et les impacts. La discussion et l'analyse sont appliquées pour les huit domaines de FUND. Dans le but de bien comprendre le processus de construction des fonctions de dommage, il est important d'être familier avec les concepts de vulnérabilité et d'adaptation inhérents à l'évaluation des impacts des changements climatiques et de cerner les limites auxquelles la présente analyse fait face.

Le degré de vulnérabilité d'un système aux changements climatiques se caractérise par l'ampleur et la variabilité des impacts auxquels il est assujéti sans pouvoir se défendre.¹¹ Lemmen et al (2007) expliquent que les facteurs qui influencent le degré de vulnérabilité d'un système comprennent « la nature des variations climatiques auxquelles il est exposé, sa sensibilité au climat [et] sa capacité de s'adapter aux changements des conditions climatiques ». L'adaptation d'un système aux changements climatiques est « l'ensemble des activités qui, d'une part, limitent les impacts négatifs de ce changement et, d'autre part, favorisent l'accès aux nouvelles possibilités offertes par ces mêmes changements ». Le modèle FUND utilise une hypothèse centrale pour modéliser la vulnérabilité : les variations dans le revenu par habitant à travers le temps peuvent servir à mesurer les effets de la croissance économique sur la vulnérabilité aux changements climatiques.¹² Plusieurs fonctions de dommage utilisent par conséquent les tendances projetées du revenu par habitant pour modéliser la vulnérabilité.

Tel que mentionné dans l'introduction, la composante des fonctions de dommage qui différencie les impacts selon les régions du monde sont les paramètres régionaux. À ce point, plusieurs obstacles rendent difficile la compréhension de la méthodologie exacte utilisée dans le calcul de ces paramètres. Tout d'abord, pour estimer ces paramètres, Tol utilise souvent des techniques de calibration qu'il applique aux résultats d'études

¹¹ Voir Lemmen et al. (2007), p.14, encadré RS-3.

¹² Voir Tol (2002b)

empiriques dont il ne dévoile pas les détails des procédures.¹³ De plus, les connaissances requises pour comprendre le fonctionnement des modèles développés dans les études empiriques vont bien au-delà des concepts relevant de la science économique. Les études traitent de plusieurs modèles climatiques globaux qui estiment des changements projetés dans les niveaux moyens de précipitation, de température et de concentration atmosphérique de CO₂. Enfin, Tol reconnaît les difficultés liées à la construction de son modèle.¹⁴ La littérature comprend des études caractérisées par un haut niveau d'incertitude, des hypothèses de base différentes (et souvent héroïques) d'un modèle à l'autre, une utilisation de différents modèles climatiques ainsi que par des régions étudiées différentes. De plus, de nombreuses études omettent de tenir compte des interactions entre les impacts des différents domaines.¹⁵

Pour toutes les fonctions de dommage analysées ci-après, les indices *t* et *r* désignent respectivement l'année *t* et la région *r*. L'analyse est seulement appliquée sur la région canadienne.

4.1. L'agriculture

Le domaine de l'agriculture de FUND estime les changements dans la production agricole brute (PAB) dus aux effets des changements climatiques. Tol se base sur les résultats de cinq études pour choisir les valeurs des paramètres régionaux des fonctions de dommage. Les études de Kane et al. (1992), Reilly et al. (1994), Fisher et al. (1993, 1996), Darwin et al. (1995, 1996) ainsi que Tsigas et al. (1996) utilisent des modèles climatiques globaux ainsi que des modèles de commerce national et international de produits agricoles pour estimer les changements dans la production et la productivité des terres de différentes régions du monde.¹⁶

¹³ Tol ne publie pas l'information permettant de comprendre les méthodes qu'il utilise dans le processus de calibration des données qu'il puise dans les différentes études de la littérature pour l'estimation des paramètres régionaux et des élasticités.

¹⁴ Tol (2002a) et (2002b) soulignent les difficultés rencontrées dans la méthodologie utilisée pour développer FUND.

¹⁵ Voir Tol (2002a)

¹⁶ Voir Tol (2002), *New Estimates of the Damage Costs of Climate Change, Part II: Dynamic Estimates*, p.137.

En utilisant les résultats de ces études, Tol a compilé les impacts monétaires avec et sans facteur d'adaptation et avec et sans effet de fertilisation du carbone.¹⁷ Les impacts sur la production agricole brute sont divisés en trois parties et chacune d'elles utilise une fonction de dommage distincte. Les fonctions et leurs paramètres sont indiqués dans le Tableau 3. Le Tableau 4 contient une description des variables et des paramètres utilisés.

La première partie estime les changements du produit agricole brut (PAB) dus au taux de changement du climat, $A_{t,r}^r$.¹⁸ La fonction de dommage utilisée estime la variation du PAB (en pourcentage) en fonction de la variation annuelle de la température régionale, ΔT_t . Le paramètre régional α_r est calibré pour estimer les dommages résultant d'une variation repère de la température de 0,04 degré Celsius (dG). Le paramètre régional α_r est toujours négatif peu importe la région. Ceci implique que les impacts dus au taux de changement du climat sont toujours négatifs. Tol soutient la présence de ces dommages en raison de l'anticipation imparfaite des variations de température par les fermiers et de leur incapacité à s'adapter parfaitement aux variations du taux de changement du climat.¹⁹ La valeur moyenne du paramètre β est 2, indiquant une relation non-linéaire entre le changement du PAB et le taux de changement climatique. Une augmentation dans le taux de changement climatique, ΔT_t , engendre par conséquent une baisse du PAB plus que proportionnelle. Le second terme de la fonction, $\rho A_{t-1,r}^r$, est positif car il modélise la capacité d'adaptation des fermiers face aux variations annuelles des températures. Le paramètre ρ représente la vitesse d'adaptation des fermiers.

La deuxième partie estime les variations du PAB dus au niveau de changement du climat, $A_{t,r}^l$. La fonction utilisée est de type quadratique et les impacts calculés peuvent être positifs ou négatifs. La forme concave que prend la fonction de dommage implique qu'il existe un niveau de climat «optimal» engendrant le maximum de bénéfices possible pour ce type d'impact. Ce niveau maximal est atteint lorsque le changement de la température régionale moyenne par rapport à 1990 (en °C), T_t , atteint son niveau optimal, T_r^{opt} , fixé à

¹⁷ Voir la description technique du modèle FUND sur le site Internet du modèle. Liens html: <http://www.fnu.zmaw.de/fileadmin/fnu-files/staff/tol/FundTechnicalDescription.pdf>

¹⁸ Le taux de changement climatique est défini ici comme le changement annuel dans le climat.

¹⁹ Voir Tol (2002b), p.137

2,92 pour le Canada. Au fur et à mesure que le phénomène des changements climatiques fait augmenter le niveau de température régional moyen et le rapproche du niveau jugé optimal, les bénéfices annuels dus au niveau de changement du climat augmentent. À l'inverse, lorsque le niveau de température moyen dépasse le niveau optimal, les bénéfices annuels diminuent. Le paramètre régional A_r^B est calibré pour estimer le changement régional du PAB (en pourcentage) du Canada.

La dernière partie du domaine de l'agriculture utilise une fonction logarithmique pour estimer les bénéfices engendrés par une plus forte concentration de dioxyde de carbone (CO_2) sur le rendement des cultures agricoles, $A_{t,r}^1$. Plusieurs études, telles que celle de Rosenzweig et al. (1995), estiment les variations du PAB des régions du monde en tenant compte de l'effet de fertilisation créé par un plus grand taux de séquestration carbonique des cultures agricoles. Une plus grande concentration de CO_2 faciliterait le phénomène de séquestration des cultures agricoles et augmenterait le taux de croissance de ces dernières. Les bénéfices engendrés par ce phénomène seaturent au fur et à mesure que les concentrations de CO_2 augmentent. Tol a donc choisi la forme logarithmique pour modéliser la fonction de dommage. Le paramètre régional positif γ_r est calibré pour estimer les bénéfices engendrés par le niveau de concentration de CO_2 par rapport au niveau préindustriel de 275 ppm. La forme fonctionnelle utilisée permet de déduire qu'une augmentation de concentration atmosphérique à travers le temps engendre une augmentation du PAB et que l'augmentation marginale est décroissante avec le niveau de concentration.

Tableau 3 : *Types d'impacts et fonctions de dommage caractérisant les équations du domaine de l'agriculture.*

Types d'impacts affectant le changement du PAB	Fonctions de dommage
1) Taux de changement du climat	$A_{t,r}^r = \alpha_r \left(\frac{\Delta T_t}{0,04} \right)^\beta + \rho A_{t-1,r}^r$
2) Niveau de changement du climat	$A_{t,r}^l = \left(\frac{-2 A_r^B T_r^{opt}}{1 - 2 T_r^{opt}} \right) T_t + \left(\frac{A_r^B}{1 - 2 T_r^{opt}} \right) T_t^2$
3) Effet de séquestration carbonique	$A_{t,r}^f = \gamma_r \ln \left(\frac{CO_{2t}}{275} \right)$

Tableau 4 : Descriptions des variables et des paramètres utilisés dans les fonctions de dommage du domaine de l'agriculture.

Types d'impacts affectant le changement du PAB	Descriptions
1) Taux de changement climatique	<ul style="list-style-type: none"> • $A_{t,r}^f$: Changement dans le PAB (en pourcentage) causé par le taux de changement du climat • α_r : Paramètre représentant le changement régional dans la production agricole pour un réchauffement annuel de 0,04 °C • ΔT_t : Changement dans la température moyenne régionale (en °C) entre la période t et t-1 • β : paramètre égale à 2, dénotant la non-linéarité de l'impact au changement de température • ρ : Paramètre représentant l'inverse de la vitesse d'adaptation des fermiers
2) Niveau de changement climatique	<ul style="list-style-type: none"> • $A_{t,r}^l$: Changement dans le PAB (en pourcentage) causé par le niveau de changement du climat • T_t : Variation de la température régionale par rapport au niveau de 1990 (en °C) • A_r^B : Changement régional (en pourcentage) dans le PAB pour un réchauffement de 1°C • T_r^{opt} : Paramètre représentant la variation de température optimale (en °C) par rapport au niveau de 1990
3) Effet de séquestration carbonique	<ul style="list-style-type: none"> • $A_{t,r}^f$: Changement dans le PAB (en pourcentage) causé par l'effet de fertilisation du carbone • γ_r : Changement régional (en pourcentage) dans le PAB pour une variation des concentrations de CO₂ par rapport au niveau préindustriel • CO_{2,t} : Concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (en ppm)
Note : Les indices t et r désignent respectivement l'année et la région évaluées.	

La démarche utilisée pour estimer les paramètres régionaux des fonctions est laborieuse. Les études empiriques estiment des dommages dans plusieurs régions du monde avec et sans le facteur d'adaptation des fermiers ainsi qu'avec et sans l'effet de fertilisation du carbone. Tol regroupe les résultats de ces cinq études empiriques et calcule une moyenne pour chacun des cas.²⁰ Le paramètre utilisé dans la première équation provient de la différence entre les résultats avec et sans le facteur d'adaptation. Celui utilisé dans la deuxième équation provient du résultat avec adaptation complète. Le paramètre de la dernière équation provient du calcul de la différence entre les résultats avec et sans effet de fertilisation du carbone. Quelques ajustements ont dû être appliqués en raison

²⁰ Voir (Tol 2002a)

d'éléments non-uniformes à travers les études. La méthodologie complète est décrite dans Tol (2002a) et Tol (2002b).

Finalement, Tol agrège les résultats des trois fonctions suivant la simple formule suivante, exprimant les variations totales annuelles du PAB, $A_{t,r}$:

$$A_{t,r} = A_{t,r}^r + A_{t,r}^f + A_{t,r}^l$$

Pour obtenir l'évolution de la part du PAB dans le PIB, $PAB_{t,r}/Y_{t,r}$, Tol utilise la relation suivante, où Y dénote le PIB :

$$\frac{PAB_{t,r}}{Y_{t,r}} = \frac{PAB_{1990,r}}{Y_{1990,r}} \left(\frac{y_{1990,r}}{y_{t,r}} \right)^\varepsilon$$

Tout d'abord, le rapport $y_{1990,r} / y_{t,r}$ représente l'inverse de l'indice de croissance du revenu par habitant de l'année t par rapport à 1990 pour la région r . Avec ε prenant une valeur moyenne de 0,31, la part du PAB dans le PIB diminue lorsque le revenu par habitant de l'année t , $y_{t,r}$, s'éloigne de celui de 1990. L'élasticité revenu de la part du PAB dans le PIB, ε , prend la valeur 0,31 (0,15-0,45) et est calculée en régressant la part régionale de l'agriculture sur le revenu national par habitant.²¹ Donc, le modèle suppose que la part du PAB dans le PIB diminue lorsque l'écart entre revenu par habitant de l'année t s'éloigne de celui de 1990. On peut donc tirer la conclusion suivante : le degré de vulnérabilité du secteur agricole diminue avec l'augmentation du revenu par habitant canadien.

4.2. La foresterie

Le nombre d'études empiriques menées dans le domaine de la foresterie est beaucoup moins élevé que dans celui de l'agriculture. Le domaine de la foresterie de FUND

²¹ Voir la description technique du modèle FUND sur le site Internet du modèle. Liens html: <http://www.fnu.zmaw.de/fileadmin/fnu-files/staff/tol/FundTechnicalDescription.pdf>

contient une fonction de dommage estimant le changement dans le surplus du consommateur et du producteur en proportion du PIB, dénoté $F_{t,r}$. La fonction suivante reprend plusieurs éléments contenus dans le domaine de l'agriculture :

$$F_{t,r} = \alpha_r \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\varepsilon \left[\left(0,5 \left(\frac{T_t}{1} \right)^\beta \right) + 0,5\gamma \ln \left(\frac{CO_{2,t}}{275} \right) \right]$$

Où :

- $F_{t,r}$ est le changement dans le surplus du consommateur et du producteur (en proportion du revenu total) de l'industrie forestière
- α_r est un paramètre régional représentant l'impact d'un réchauffement du climat de 1 °C sur le bien-être économique
- $y_{t,r}$ désigne le revenu par habitant (en dollar US par personne par année de l'année 1995)
- ε désigne l'élasticité revenu de l'industrie agricole
- T_t désigne la température moyenne globale (en °C)
- β est un paramètre égal à 1, dénotant une linéarité entre l'impact et la variation de la température
- γ est un paramètre qui permet de calibrer l'équation de telle sorte qu'un doublement de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone engendre une augmentation de la valeur de la forêt de 15%
- $CO_{2,t}$ désigne la Concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (en ppm)
- Les indices t et r désignent respectivement l'année et la région évaluées

Contrairement au domaine de l'agriculture, l'élasticité revenu de la part du surplus forestier dans le PIB ε , prenant la valeur 0,31, est appliquée à l'indice de croissance du revenu par habitant, $y_{t,r} / y_{1990,r}$. Par conséquent, l'importance du domaine de la foresterie dans l'économie dans le PIB augmente lorsque le revenu par habitant de l'année t s'éloigne de celui de 1990. En raison d'un manque de résultats empiriques sur le sujet, l'élasticité choisie est la même que dans le domaine de l'agriculture. Cependant, l'étude

de Perez-Garcia (1995) suggère que la relation entre l'impact sur le secteur forestier et le changement de la température global moyenne est linéaire.²² La valeur moyenne du paramètre β est par conséquent égale à 1. L'effet de fertilisation du carbone sur la croissance des forêts est positif. Le paramètre γ est fixé de telle sorte qu'un doublage de la concentration atmosphérique de carbone engendre une augmentation de la valeur forestière de 15 %.²³ Tout comme le paramètre du domaine de l'agriculture, il est calibré pour estimer les bénéfices engendrés par le niveau de concentration de CO₂ par rapport au niveau préindustriel de 275 ppm.

Le paramètre régional canadien α_r prend une valeur positive, ce qui implique que le modèle projette strictement des bénéfices pour toutes les années. Il est donc explicitement indiqué que les impacts des changements climatiques de FUND dans le domaine de la foresterie au Canada sont positifs (bénéfices). Ces impacts omettent cependant les augmentations possibles de feux de forêts et d'invasions d'insectes nuisibles au développement des forêts canadiennes. Le paramètre α_r est le résultat d'une moyenne des résultats de Perez-Garcia et al. (1995) et Sohngen et al. (2001). Les poids respectifs de l'augmentation de la température et de l'effet de fertilisation du carbone sur les résultats sont les mêmes, donnés par 0,5. Contrairement au domaine de l'agriculture, le degré de vulnérabilité du secteur forestier augmente lorsque le revenu par habitant canadien augmente. Une augmentation du revenu par habitant fait accroître la valeur des bénéfices du secteur forestier dus au changement climatique.

4.3. Les ressources en eau

Le domaine des ressources en eau estime les impacts des changements climatiques sur l'offre et la demande en eau. L'étude clé sur laquelle se base le choix des paramètres est celle de Downing et al. (1996). Cette étude estime les impacts de plusieurs régions du monde dans l'offre et la demande en eau en utilisant les variations de précipitations et d'évapotranspiration projetées pour calculer les surplus et les déficits d'eau potable et

²² Voir Tol (2002a)

²³ Le paramètre est le résultat de l'étude de Gitay et al. (2001)

leurs impacts sur la demande et l'offre de la ressource.²⁴ La fonction utilisée prend la forme d'une fonction qui a pour conséquence de limiter les dommages annuels aux ressources en eau nationales, $W_{t,r}$, à 10% du produit intérieur brut. Il s'agit de :

$$W_{t,r} = \min \left\{ \alpha_r Y_{1990,r} (1 - \tau)^{t-2000} \left(\frac{Y_{t,r}}{Y_{1990,r}} \right)^\beta \left(\frac{T_t}{1} \right)^\gamma, \left(\frac{Y_{t,r}}{10} \right) \right\}$$

Où :

- $W_{t,r}$ exprime la valeur du changement dans les ressources en eau disponibles (en dollar US de l'année 1995)
- α_r est un paramètre régional spécifiant l'impact repère de l'année 1990
- τ est un paramètre mesurant le progrès technologique dans le domaine de l'offre et la demande en eau
- $Y_{t,r}$ désigne le PIB (en dollar US de l'année 1995)
- β est un paramètre spécifiant la mesure dans laquelle les impacts varient en rapport avec la croissance économique
- T_t désigne la température moyenne globale (en °C)
- γ est un paramètre spécifiant la mesure dans laquelle les impacts varient en rapport avec l'augmentation de la température
- Les indices t et r désignent respectivement l'année et la région évaluées

En dessous de ce niveau maximal possible de dommages, une augmentation de l'indice de croissance du PIB par rapport au niveau de 1990, $y_{t,r} / y_{1990,r}$, augmente la vulnérabilité de l'économie en raison d'une demande plus élevée et des déficits d'approvisionnement plus fréquents (Downing et al, 1996). Le paramètre β prenant valeur moyenne de 0,85, les dommages causés sont moins que proportionnels à l'augmentation de l'indice de croissance du PIB. Ce paramètre est le résultat d'une calibration des données des études de Downing et al. (1996) qui permet d'évaluer la variation des impacts à la croissance

²⁴ Voir Downing et al 1996, p.34

économique.²⁵ En raison de la valeur moyenne égale à 1 du paramètre γ , les dommages augmentent linéairement avec l'augmentation de la température (Tol 2002b). Le progrès technologique dans le secteur de l'eau peut faire diminuer les dommages. Cette possibilité est modélisée par le paramètre τ . Le progrès technologique augmente de façon géométrique. Cette progression est cependant lente, car le paramètre τ prend une valeur moyenne de 0,005. Enfin, le paramètre régional α_r prend une valeur négative pour le Canada, ce qui implique des pertes économiques croissantes avec l'augmentation du niveau de température et du PIB.

4.4. La consommation d'énergie

Le domaine de l'énergie estime les variations dans les dépenses en consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation résultant du phénomène des changements climatiques. Deux fonctions de dommage servent à estimer respectivement la diminution des dépenses en énergie pour le chauffage et l'augmentation des dépenses en énergie pour la climatisation. La construction de ces deux fonctions est très similaire. La diminution des dépenses en chauffage $SH_{t,r}$ et l'augmentation des dépenses en climatisation $SC_{t,r}$ réagissent positivement avec l'augmentation de la température T_t , du revenu par habitant national $y_{t,r}$ et de la population $P_{t,r}$. L'amélioration de l'efficacité énergétique autonome $AEEI_{s,r}$ permet de faire diminuer les coûts pour le chauffage et la climatisation. Le paramètre ε , prenant une valeur moyenne de 0,8 correspond à l'élasticité de la demande pour le chauffage et la climatisation. Bien que certaines études telles que Downing et al (1996) suggèrent une valeur de 0,2, Tol estime qu'une plus grande valeur permet de mieux représenter la situation des pays pauvres. Le modèle n'attribue cependant pas une valeur différente à ε pour les différentes régions du monde. Les deux fonctions du domaine de la consommation d'énergie pour la diminution des dépenses en chauffage et l'augmentation des dépenses en climatisation sont respectivement :

$$SH_{t,r} = \alpha_r Y_{1990,r} \left(\frac{T_t}{1} \right)^\beta \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\varepsilon \left(\frac{P_{t,r}}{P_{1990,r}} \right)^\varepsilon \left/ \prod_{s=1990}^t AEEI_{s,r} \right.$$

²⁵ Voir la description technique du modèle FUND sur le site Internet du modèle. Liens html: <http://www.fnu.zmaw.de/fileadmin/fnu-files/staff/tol/FundTechnicalDescription.pdf>

$$SC_{t,r} = \alpha_r Y_{1990,r} \left(\frac{T_t}{1} \right)^\beta \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^\varepsilon \left(\frac{P_{t,r}}{P_{1990,r}} \right) / \prod_{s=1990}^t AEEI_{s,r}$$

Où :

- $SH_{t,r}$ est la diminution des dépenses en chauffage (en dollar US de l'année 1995)
- $SC_{t,r}$ est l'augmentation des dépenses en climatisation (en dollar US de l'année 1995)
- α_r est un paramètre représentant l'impact repère
- $Y_{t,r}$ désigne le PIB (en dollar US de l'année 1995)
- $y_{t,r}$ désigne le revenu par habitant (en dollar US par personne par année de l'année 1995)
- T_t désigne la température moyenne globale (en °C)
- β est un paramètre spécifiant la mesure dans laquelle les impacts varient en rapport avec l'augmentation de la température
- ε est l'élasticité revenu de la demande en chauffage
- $P_{t,r}$ désigne la population
- $AEEI_{s,r}$ est un paramètre représentant l'amélioration de l'efficacité énergétique autonome
- Les indices t et r désignent respectivement l'année et la région évaluées

Deux éléments distinguent cependant les deux fonctions. La valeur du paramètre régional canadien α_r prend une valeur positive pour la diminution des dépenses en chauffage $SH_{t,r}$ et prend une valeur négative pour l'augmentation des dépenses en climatisation $SC_{t,r}$ pour modéliser respectivement des gains et des pertes résultant des changements climatiques dans le marché de la consommation d'énergie. La valeur absolue du paramètre α_r pour la diminution des dépenses en chauffage est supérieure à celle de l'augmentation des dépenses en climatisation. Ceci implique que, toute chose étant égale par ailleurs, les pertes liées à la climatisation estivale sont plus que compensées par les gains liés au chauffage hivernale. Enfin, dans le cas des dépenses en chauffage $SH_{t,r}$, les économies engendrées par une baisse de consommation en énergie pour le chauffage plafonnent au

fur et à mesure que la température augmente. Pour modéliser ce comportement, le paramètre β prend la valeur moyenne 0,5, ce qui implique qu'une augmentation de la température affecte dans de moindres proportions la diminution des dépenses pour le chauffage. Pour les dépenses en climatisation, la température affecte de manière plus que proportionnelle l'augmentation des dépenses puisque les dépenses en climatisation augmentent rapidement lorsque le réchauffement climatique s'accélère avec β égale à 1,5.

Bien que Tol affirme construire ces équations en se basant principalement sur l'étude de Downing et al (1996), plusieurs contradictions sont observées. Par exemple, l'étude de Downing et al (1996 : 27) affirme que la demande en énergie pour la climatisation augmente plus rapidement que l'augmentation de la population et du revenu. Cette relation n'est pas respectée dans l'équation calculant $SC_{t,r}$ puisque les élasticités de la demande pour les variables du revenu par habitant et de la population sont respectivement de 0,8 et un. Le modèle suppose aussi que le réchauffement climatique engendrera des hivers plus doux et qu'ainsi les dépenses en chauffage diminueront. Les rapports discutés dans la revue de la littérature soutiennent cependant que les froids hivernaux s'avèreraient plus intenses.

4.5. L'élévation du niveau de la mer

Le domaine de l'élévation du niveau de la mer estime les dommages causés aux marécages et aux terres fermes résultant de l'augmentation du niveau de la mer. Le domaine comprend aussi des fonctions permettant d'estimer le taux de protection optimal des côtes des régions du monde et les coûts associés à la protection. Cependant, les données fournies ne comprennent pas de paramètres spécifiques au Canada. Les estimations de référence²⁶ permettent seulement d'estimer les impacts pour l'ensemble des pays de l'Amérique du Nord. Pour cette raison, le calcul des impacts canadiens développé dans la prochaine section du présent rapport n'inclut pas les dommages causés par l'augmentation du niveau de la mer.

²⁶ Voir le tableau SLR pour les prévisions du modèle FUND dans le domaine de l'élévation du niveau de la mer sur le site Internet du modèle. Liens html: <http://www.mi.uni-hamburg.de/fileadmin/fnu-files/staff/tol/FundTechnicalTables.pdf>

4.6. Les écosystèmes

Le domaine des écosystèmes utilise une fonction de dommage pour estimer les impacts des changements climatiques sur les écosystèmes, la biodiversité, les espèces et les paysages. Puisque les valeurs marchandes de ces actifs naturels sont inconnues, Tol se base sur des études estimant la volonté à payer (VAP) des individus pour préserver la biodiversité des milieux naturels de leur pays. La volonté moyenne à payer pour la totalité des pays de l'OCDE est de 50\$ par personne. Il s'agit de la valeur utilisée dans la fonction de dommage du domaine. La VAP étant agrégée au niveau de toute la population, la fonction de dommage estime en termes monétaires la valeur de non-usage que peuvent procurer les écosystèmes canadiens plutôt que la valeur d'usage.²⁷ La valeur récréative des écosystèmes est donc omise du calcul. La méthode d'évaluation contingente généralement utilisée dans la littérature pour valoriser les paysages, la préservation d'espèces ainsi qu'un équilibre écologique comporte certains biais. Premièrement, étant donné que le phénomène des changements climatiques est généralement perçu comme quelque chose de mauvais, les impacts négatifs préoccupent davantage les gens que les impacts positifs.²⁸ Deuxièmement, les changements survenus dans le passé influencent davantage les gens que les changements susceptibles de se réaliser dans le futur.²⁹ La fonction de dommage utilisée estime les pertes monétaires annuelles, $E_{t,r}$, de la valeur des écosystèmes comme suit :

$$E_{t,r} = \alpha P_{t,r} \frac{\frac{y_{t,r}}{y_r^b}}{1 + \frac{y_{t,r}}{y_r^b}} \frac{\frac{\Delta_t}{\tau}}{1 + \frac{\Delta_t}{\tau}} \left(1 - \sigma + \sigma \frac{B_0}{B_t} \right)$$

Où :

- $E_{t,r}$ désigne la perte de valeur des écosystèmes (en dollar US de l'année 1995)
- α est un paramètre

²⁷ Voir Tol 2002a, p.55. Pearce et Moran (1994) développent davantage sur la valorisation économique de la biodiversité.

²⁸ Voir Tol (2002a), p.54.

²⁹ Idem.

- $P_{t,r}$ désigne la population (en millions)
- $y_{t,r}$ désigne le revenu par habitant (en dollar US par personne par année de l'année 1995). y^b_r est fixé à 30 000\$.
- ΔT_t est le changement dans la température moyenne régionale (en °C) entre la période t et t-1
- τ est le niveau de changement de température repère
- σ est un paramètre indéfini
- B_t est le nombre d'espèces
- Les indices t et r désignent respectivement l'année et la région évaluées

Le paramètre α prend la valeur 50 et correspond à la VAP moyenne de l'OCDE discutée dans le paragraphe ci haut. Les pertes économiques du domaine des écosystèmes augmentent avec l'augmentation de la population, $P_{t,r}$, du revenu par habitant, $y_{t,r}$, ainsi que de la variation de la température, ΔT_t . Le paramètre régional α est calibré pour estimer les impacts par rapport à une variation repère de la température de $\tau = 0,025$ °C. Les pertes totales augmentent lorsque le nombre d'espèces existantes diminue. Le minimum d'espèces pouvant exister est fixé à $B_0 = 14$ millions et le nombre d'espèces évolue à travers le temps selon la fonction suivante :

$$B_t = \max \left\{ \frac{B_0}{100}, B_{t-1} \left(1 - \rho - \frac{\gamma \Delta T^2}{\tau^2} \right) \right\}$$

Le cas extrême suggère un nombre minimal d'espèces de 140 000. Sinon, le nombre d'espèce est une fonction convexe et décroissante de la variation de la température moyenne régionale, ΔT_t . La nature des paramètres γ , ρ sont des approximations effectuées par les experts.³⁰ Le document descriptif de Tol ne spécifie pas les raisons pour l'utilisation de ces paramètres.

³⁰ Voir la description technique du modèle FUND sur le site Internet du modèle. Liens html: <http://www.fnu.zmaw.de/fileadmin/fnu-files/staff/tol/FundTechnicalDescription.pdf>

4.7. La santé humaine

Le domaine de la santé humaine évalue les impacts des changements climatiques sur les taux de mortalité et de morbidité causés par la diarrhée, par les maladies à transmission vectorielle telles que la malaria, la schistosomiase et la dengue ainsi que les problèmes respiratoires et cardiovasculaires dus aux froids et aux chaleurs intenses. Dans le but d'attribuer une valeur monétaire à la mortalité et à la morbidité, Tol se base sur les études de Cline (1992) et Navrud (2001). Dans le cas de la région du Canada, les impacts engendrés par les maladies à transmission vectorielle sont nuls. Les impacts de ces maladies concernent davantage les pays de l'hémisphère sud du globe.

Le domaine de la santé humaine n'évalue pas les impacts de la prolifération de maladies autres que celles transmises par des vecteurs. Il n'évalue pas les effets sur la santé d'une baisse de la qualité de l'air que pourrait engendrer le réchauffement climatique. Enfin, les inondations et les sécheresses agricoles peuvent augmenter le nombre de personnes atteintes de maladies et créer des famines. Ces impacts ne sont pas capturés dans le domaine. Le modèle FUND évalue la perte d'une vie humaine à 200 fois la valeur du revenu par habitant et une année de morbidité à 80% de la valeur du revenu par habitant. Le domaine de la santé humaine est l'un des domaines le plus vulnérable aux changements climatiques pour le Canada. Le modèle FUND projette des bénéfices pour le Canada, en raison des réductions de mortalités reliées aux froids intenses qui excéderont les augmentations de mortalités causées par les chaleurs intenses. Les bénéfices annuels projetés dans le domaine de la santé prennent des valeurs considérablement élevées.³¹ Ces résultats sont la conséquence d'une valorisation élevée d'une vie humaine et d'une année de morbidité. Les nombreuses préoccupations soulevées par le rapport de Santé Canada intitulé *Santé et changements climatiques : Évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada*³² tendent à soutenir que les changements climatiques affecteront davantage négativement la santé des canadiens que le contraire.

³¹ Les résultats pour le domaine de la santé sont contenus dans le rapport de Warren et al. (2006)

³² Ce rapport évalue les impacts canadiens spécifiques au domaine de la santé humaine. Voir Séguin et Berry (2008)

Le domaine de la santé humaine du modèle FUND comporte plusieurs fonctions dont certains paramètres et unités de mesures ne sont pas explicitement définis. De plus, le calcul de certains impacts du domaine nécessite l'utilisation de certaines projections sur la densité urbaine de la population canadiennes. Le modèle ne fournit pas ces projections. En raison de ces facteurs, il a été impossible de calculer des résultats fiables et les résultats des calculs présentés dans la prochaine section du rapport n'incluent pas le domaine de la santé humaine.

4.8. Les phénomènes météorologiques extrêmes

Le domaine des phénomènes météorologiques extrêmes estime les impacts des changements climatiques causés par les tempêtes. Les deux types de dommages calculés sont les dommages économiques, $TD_{t,r}$, et la mortalité, $TM_{t,r}$, résultant de l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des tempêtes. L'étude de Toya et Skidmore (2007) procure au modèle de Tol les élasticités revenu des dommages en capitaux et en vies humaines provoqués par les tempêtes. Ces élasticités revenu, respectivement dénotées ϵ et η , sont négatives. Ceci indique que l'augmentation du revenu par habitant fait diminuer la vulnérabilité du Canada face aux dommages économiques et à la mortalité reliés aux désastres naturels au Canada.

Le réchauffement climatique engendre une augmentation de l'intensité et de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes. Le modèle FUND modélise l'impact la puissance du vent, $(1+\delta T_{t,r})^\gamma$ en fonction de l'augmentation de la température par rapport au niveau préindustriel, $T_{t,r}$. Le paramètre δ indique comment la vitesse du vent augmente par 1°C de réchauffement du climat. Les impacts des phénomènes météorologiques extrêmes sur l'économie canadienne sont calculés respectivement pour les dommages et la mortalité comme suit :

$$\frac{TD_{t,r}}{Y_{t,r}} = \alpha_{t,r} \left(\frac{Y_{t,r}}{Y_{1990,r}} \right)^\epsilon \left[(1 + \beta T_{t,r})^\gamma - 1 \right]$$

$$\frac{TM_{t,r}}{Y_{t,r}} = \beta_{t,r} \left(\frac{Y_{t,r}}{Y_{1990,r}} \right)^{\eta} \left[(1 + \delta T_{t,r})^{\gamma} - 1 \right]$$

Où :

- $TD_{t,r}$ désigne les impacts des dommages causés par les phénomènes météorologiques extrêmes (en milliers de dollar US de l'année 1995)
- $TM_{t,r}$ désigne les impacts de la mortalité causés par les phénomènes météorologiques extrêmes (en milliers de dollar US de l'année 1995)
- $Y_{t,r}$ désigne de PIB (en billion dollar US de l'année 1995)
- α est un paramètre spécifiant l'impact repère pour les impacts relatifs aux dommages
- $T_{t,r}$ désigne l'augmentation de la température par rapport au niveau préindustriel (en °C).
- β est un paramètre spécifiant l'impact repère pour les impacts relatifs à la mortalité
- $y_{t,r}$ désigne le revenu par habitant (en dollar US de l'année 1995)
- ε et η sont les élasticités revenu des dommages et de la mortalité des intempéries respectivement
- δ est un paramètre indiquant dans quelle mesure la vitesse du vent augmente avec l'augmentation de la température
- γ égale à 3, puisque la force du vent est le cube de sa vitesse

Les paramètres régionaux α et β sont estimés en utilisant des données de l'*emergency events database (EMDAT)*.³³ Leurs valeurs sont très proches de zéro, particulièrement pour la mortalité, ce qui laisse entendre des dommages négligeables dans le cas du Canada.

³³ Voir le site Internet de l'*emergency events database*, lien *HTML* : www.emdat.be

5. Calcul et évaluation des résultats

Cette partie décrit la méthodologie utilisée pour calculer les résultats, analyse de façon succincte les principaux résultats obtenus et évalue l'influence respective des principales variables intrants sur les résultats.

5.1. Méthodologie des calculs

Le calcul des fonctions de dommage du modèle FUND nécessite l'utilisation de variables de type socio-économique, de paramètres régionaux canadiens, ainsi que de divers multiplicateurs et élasticités fournis par le modèle. Les trois variables socio-économiques de base utilisées dans le module d'impacts économiques sont la population, le produit intérieur brut, et l'amélioration de l'efficacité énergétique autonome. La population et le produit intérieur brut de l'année 1990 utilisées sont tirés directement des feuilles de calcul³⁴ du modèle FUND. Les niveaux de population, de revenu par habitant, ainsi que d'amélioration de l'efficacité énergétique autonome des années 2000 à 2100 sont calculés en utilisant les indices contenus dans les tableaux³⁵ du modèle FUND. Ces indices déterminent les niveaux des variables par rapports à l'année de référence, 1990.

Les variables climatiques de base présentes dans les fonctions de dommage sont les niveaux de température globale et régionale, ainsi que le niveau de concentration de dioxyde de carbone de l'atmosphère. Le module climatique permet de calculer ces variables. Cependant, ce dernier n'a pas été utilisé pour extraire les données climatiques en raison de nombreux inconnus relatifs aux fonctions du module. Les variables climatiques utilisées sont donc tirées de sources externes aux travaux de Tol. La valeur de la température moyenne globale de 1990³⁶ est tirée de *l'Earth Policy Institute* et les augmentations relatives du niveau de température par rapport à 1990 sont tirées du *Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC)*, tout comme les

³⁴ Voir la description technique du modèle FUND sur le site Internet du modèle. Liens html: <http://www.fnu.zmaw.de/fileadmin/fnu-files/staff/tol/FundTechnicalDescription.pdf>

³⁵ Voir les tableaux de prévisions du modèle FUND sur le site Internet du modèle. Liens html: <http://www.mi.uni-hamburg.de/fileadmin/fnu-files/staff/tol/FundTechnicalTables.pdf>

³⁶ Voir le tableau du site Internet de l'Earth Policy Institute. Lien HTML : http://www.earth-policy.org/Indicators/Temp/Temp_data.htm#fig5

niveaux de concentration de CO₂³⁷. Toutes les variables utilisées provenant d'une source externe au modèle FUND sont disponibles pour les quatre scénarios de référence du GIEC, soit les scénarios A1B, A2, B1 et B2. Tous les paramètres des fonctions de dommage possèdent des écarts types. Les résultats présentés dans cette partie sont calculés en utilisant les valeurs moyennes des paramètres. Enfin, les résultats sont présentés pour la période de 2000 à 2100 et les calculs ont été effectués avec le logiciel de traitement de données *Excel*.

5.2. Résultats

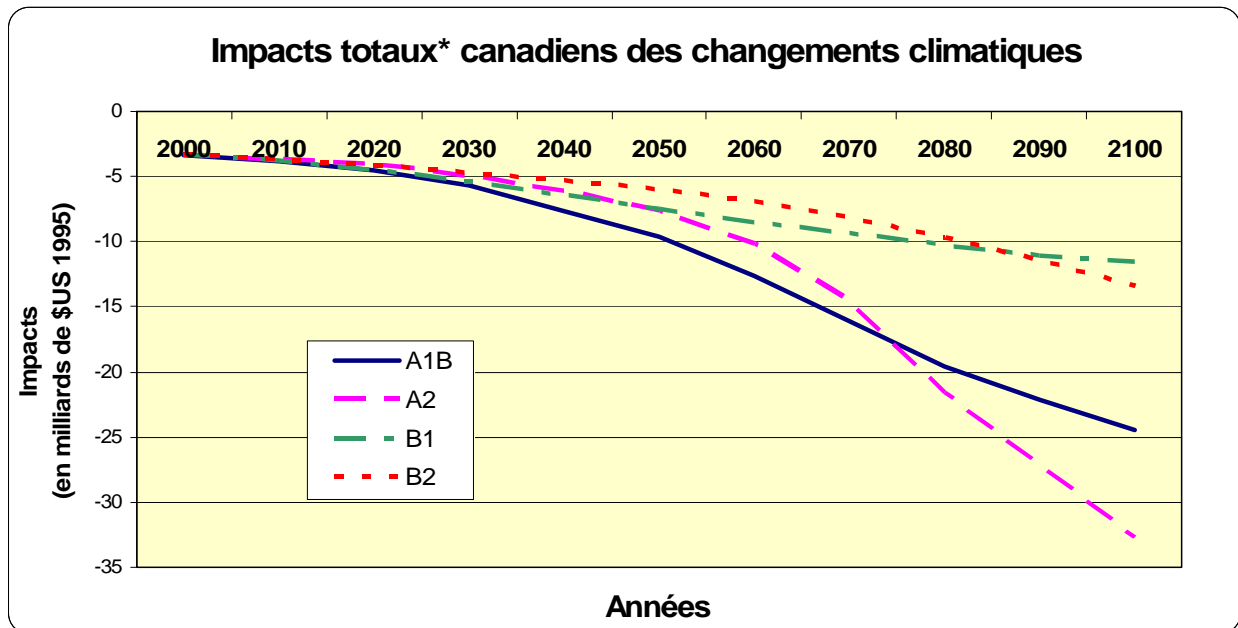
En excluant les domaines de l'élévation du niveau de la mer et de la santé humaine, les résultats obtenus, illustrés par le Graphique 1, suggèrent des dommages nets pour tous les scénarios socio-économiques. Le rapport du *Tyndall Centre for Climate Change Research* intitulé *Spotlighting Impacts Functions in Integrated Assessment*³⁸ tend à confirmer que les impacts pour l'Amérique du Nord entière se traduisent par des bénéfices nets. Ce résultat tient cependant compte du domaine de la santé humaine, qui contient une part importante des bénéfices. Cette observation est en partie expliquée par les valeurs élevées que le modèle FUND accorde à la mortalité (une mortalité est valorisée à 200 fois le revenu par habitant du pays) et à la morbidité (une année de morbidité est valorisée à 80% du niveau de revenu par habitant du pays par année de maladie).³⁹ Les scénarios des familles A1B et A2 présentent des dommages plus importants que ceux des familles B1 et B2, principalement en raison des croissances projetées du PIB et de l'augmentation de la température relativement supérieures dans les familles A1B et A2 que dans les familles B1 et B2. Les graphiques de l'Annexe 5 illustrent les projections de ces variables.

³⁷ Voir le tableau sur le site Internet du GIEC. Lien HTML : http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/552.htm

³⁸ Voir Warren et al (2006)

³⁹ Voir la description technique du modèle FUND sur le site Internet du modèle. Liens html: <http://www.fnu.zmaw.de/fileadmin/fnu-files/staff/tol/FundTechnicalDescription.pdf>

Graphique 1



* Les résultats du graphique omettent les domaines de l'élévation du niveau de la mer et de la santé humaine.

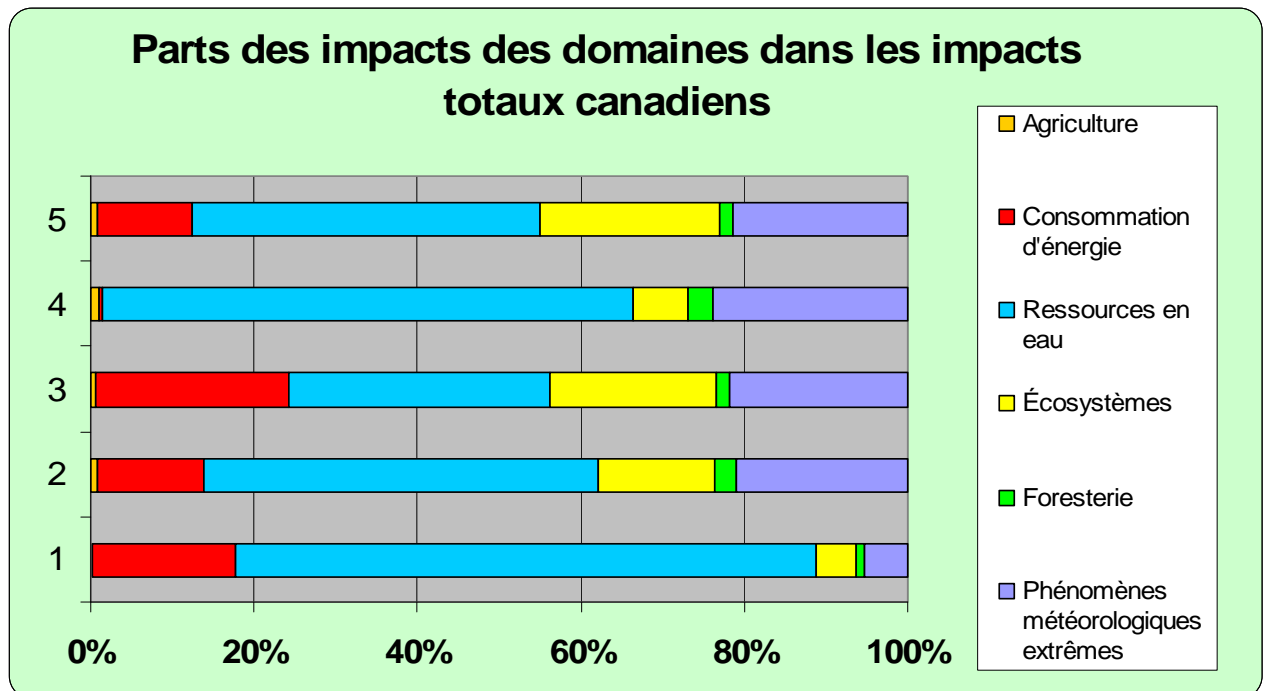
Les résultats observés démontrent que les scénarios des familles B1 et B2, davantage axés sur la protection de l'environnement et la viabilité économique, comportent beaucoup moins de dommages pour l'économie canadienne que les scénarios des familles A1B et B2. L'Annexe 6 contient les résultats des estimations pour les six domaines économiques calculés.

Les estimations produites suggèrent des bénéfices pour le Canada dans les domaines de l'agriculture et de la foresterie. Pour le domaine de l'agriculture, les bénéfices projetés s'expliquent en grande partie par une plus grande importance accordée à l'influence du niveau de changement du climat dans les impacts agricoles qu'au taux de changement du climat.⁴⁰ Les estimations suggèrent des gains nets dans le domaine de la consommation d'énergie pour tous les scénarios jusqu'en 2060. Après cette période, l'augmentation des dépenses en climatisation excède la diminution des dépenses en chauffage pour les scénarios A1B et A2. Les domaines des ressources en eau, des écosystèmes et des phénomènes météorologiques extrêmes prévoient des pertes économiques pour tous les

⁴⁰ La valeur relativement plus élevée du paramètre régional A_r^B comparativement aux autres paramètres régionaux en témoigne.

scénarios. De tous les domaines évalués, l'économie canadienne sera affectée de manière plus importante dans les domaines de l'agriculture, des ressources en eau et des écosystèmes⁴¹. L'Illustration 1 montre les parts des impacts des domaines calculés dans les impacts totaux. La barre numéro 1 montre la part des domaines pour l'année 2000 pour tous les scénarios (l'année 2000 projette les mêmes impacts pour tous les scénarios car il s'agit de l'année de référence). Les barres 2 à 5 montrent les parts des domaines de l'année 2100 pour les scénarios A1B, A2, B1 et B2 respectivement. Avec le temps, les domaines de l'agriculture et des écosystèmes prennent plus d'importance au profit du domaine des ressources en eau.

Illustration 1



Note : Les impacts peuvent être des bénéfices comme des pertes.

⁴¹ Le domaine des écosystèmes utilise cependant un paramètre régional dont la valeur calculée tient compte du concept de la volonté à payer (VAP) des individus pour préserver la biodiversité des milieux naturels de leur pays. Ces résultats ne reflètent pas la valeur réelle des écosystèmes dans leur rôle de préservation des rives, de ralentissement de l'érosion des sols, de pollinisation des cultures et d'opportunités de découvertes de nouveaux médicaments.

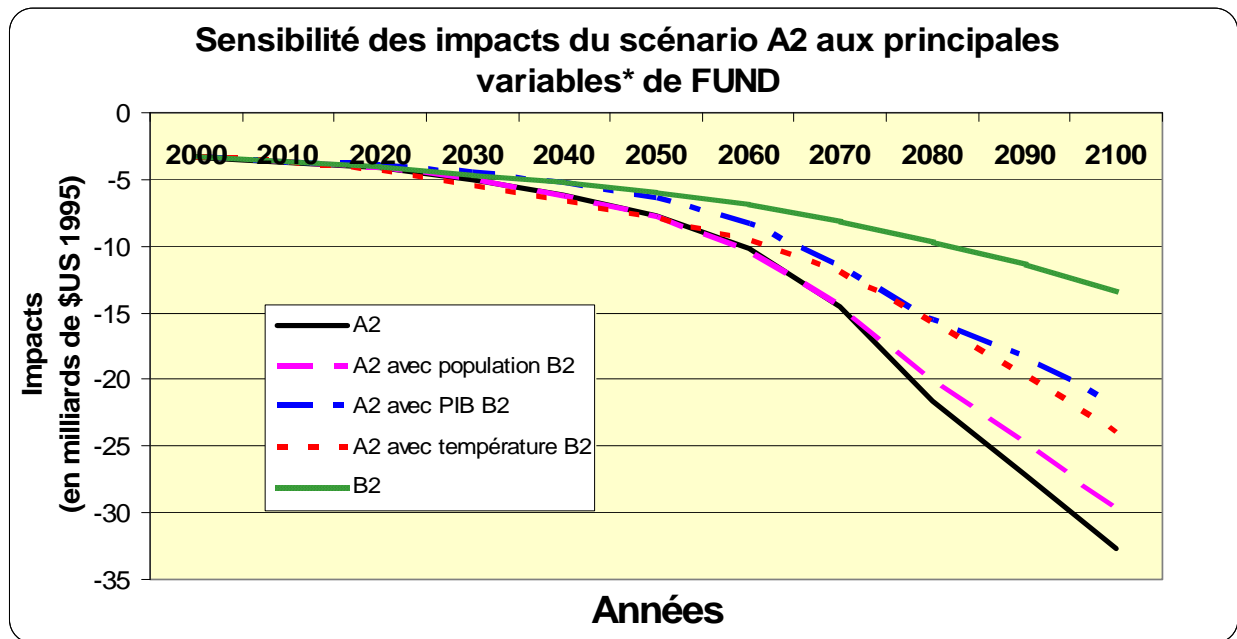
5.3. Sensibilité des impacts

Cette partie évalue le degré d'influence des principales variables socio-économiques du modèle FUND sur les résultats, afin d'évaluer dans quelle mesure chacune d'elles fait augmenter ou diminuer les impacts canadiens. La démarche utilisée est d'abord expliquée.

Cette étude de sensibilité consiste à choisir deux scénarios, l'un projetant de faibles dommages, et l'autre projetant des dommages élevés, et de déterminer les variables qui justifient l'écart de dommages observés entre les deux scénarios. Le scénario projetant des dommages élevés, A2, est utilisé comme scénario repère et les données des variables du scénario projetant de faibles dommages, B2, sont utilisées séparément. Les variations des impacts sont donc simulées en remplaçant les données d'une variable intrant spécifique du scénario A2 par celles du scénario B2 et en maintenant les autres accordées aux données du scénario A2. Les principales variables de base⁴² du modèle FUND sont la population, le PIB et la variation de la température. Le Graphique 2 illustre comment les impacts du scénario A2 varient en utilisant à tour de rôle les données des variables de la population, du PIB et de la variation de la température du scénario B2. Les graphiques de l'Annexe 5 illustrent dans quelle mesure le scénario B2 projette des croissances de la population, du PIB et de la variation de la température inférieures par rapport au scénario A2.

⁴² Le revenu par habitant est aussi une variable centrale du modèle. Elle peut par contre être construite en utilisant les données sur la population et le PIB. Le revenu par habitant n'est donc pas considéré comme une variable de base dans l'analyse.

Graphique 2



* Les variables du niveau de concentration de CO₂ et de l'amélioration de l'efficacité énergétique autonome ne sont pas inclus dans le graphique parce que la sensibilité des résultats agrégés varie peu avec celles-ci.

5.3.1. La population

Les résultats suggèrent qu'une population plus faible engendre une augmentation des dommages. Cette observation peut être expliquée en analysant les effets directs et indirects qu'a le niveau de population sur les impacts.

Les effets directs, observés lorsque la variable $P_{t,r}$ se trouve dans une fonction quelconque, sont présents dans les domaines de la consommation d'énergie, des écosystèmes et des phénomènes météorologiques extrêmes. Dans le domaine de la consommation d'énergie, la diminution de la croissance de la population fait diminuer les hausses de dépenses en climatisation et les baisses de dépenses en chauffage en raison des baisses de la consommation. Puisque l'effet des dépenses en chauffage domine sur l'effet des dépenses en climatisation,⁴³ la croissance plus faible de la population résulte en une augmentation des dommages. Pour le domaine des écosystèmes, les dommages causés à la biodiversité sont principalement fonction de la volonté à payer des canadiens

⁴³ La valeur du paramètre régional attribué à la fonction de dommage des dépenses en chauffage est supérieure, en valeur absolue, à la valeur du paramètre régional attribué à la fonction de dommage des dépenses en climatisation.

pour la conservation des espèces. Par conséquent, la diminution de la croissance de la population canadienne se traduit par une diminution du nombre d'individus qui valorisent la biodiversité et par conséquent, atténue les dommages causés aux écosystèmes. Puis, la diminution de la croissance de la population engendre une diminution du nombre de personnes sujettes à être victimes de l'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes, et donc les dommages observés dans le domaine sont moindres. Les effets directs d'une croissance de la population plus faible engendrent des bénéfices nets car la somme des changements observés dans les domaines des écosystèmes et des phénomènes météorologiques extrêmes domine les changements observés dans le domaine de la consommation énergétique.

Pour un scénario donné, une croissance de la population plus faible se traduit par une augmentation de la croissance du niveau de revenu par habitant. Cette interaction produit des effets indirects sur les impacts dans tous les domaines, à l'exception de celui des ressources en eau. L'augmentation de la croissance du revenu par habitant engendre une augmentation des bénéfices des domaines de la consommation d'énergie et de la foresterie, une diminution des bénéfices du domaine de l'agriculture et une augmentation des dommages des domaines des écosystèmes et des phénomènes météorologiques extrêmes. L'influence nette des effets indirects engendre une augmentation des dommages, particulièrement en raison de l'influence importante du revenu par habitant dans le domaine des écosystèmes. L'augmentation des bénéfices due aux effets directs domine l'augmentation des dommages due aux effets indirects, ce qui explique les dommages plus faibles lorsque les données de la population du scénario B2 sont utilisées avec les autres données des variables du scénario A2.

5.3.2. Le produit intérieur brut

Une croissance de la production plus faible dans le scénario B2 par rapport au scénario A2 contribue de façon importante à une diminution des dommages estimés. Cette observation est expliquée par la diminution importante des pressions de la croissance économique sur les ressources en eau et une volonté à payer moindres des canadiens pour la conservation de la biodiversité. Aussi, dans un contexte futur de faible croissance

économique, la production agricole prend une place plus importante dans l'économie canadienne que dans un contexte de forte croissance, ce qui a comme conséquence de faire augmenter les bénéfices canadiens du réchauffement du climat pour le domaine de l'agriculture.

5.3.3. La température

Une diminution de la croissance de la température engendre une baisse importante des dommages. Lorsque les niveaux de température du scénario B2 sont appliqués au scénario A2, les dommages de l'année 2100 pour le scénario B2 diminuent de 35% par rapport à ceux du scénario A2. Ce résultat indique que l'approche locale et régionale en matière de développement et de protection de l'environnement et une croissance plus faible de la production ralentissent le phénomène du réchauffement du climat. Il serait intéressant de comparer les bénéfices annuels résultant des dommages plus faibles avec les pertes économiques annuels reliées à la diminution de la production. Cet aspect sera traité dans la septième partie de la recherche.

5.3.4. La concentration de CO₂ et l'amélioration de l'efficacité énergétique autonome

La variable du niveau de concentration atmosphérique de CO₂ est utilisée pour modéliser les bénéfices engendrés par l'effet de la séquestration du carbone dans les domaines de l'agriculture et de la foresterie. Par rapport au scénario A2, le scénario B2 projette une croissance du niveau de concentration de CO₂ inférieure. Pour un scénario donné, une baisse de l'augmentation de la concentration de CO₂ engendre des dommages supérieurs. Le même raisonnement est vrai pour la variable de l'amélioration de l'efficacité énergétique autonome. La croissance de l'amélioration de l'efficacité énergétique autonome inférieure dans le scénario B2 fait respectivement diminuer et augmenter les bénéfices et les dommages observés dans le domaine de la consommation d'énergie.

6. Les stratégies d'atténuation des dommages

Les modèles d'évaluation intégrés tels que FUND tentent de fournir un aperçu des domaines économiques touchés par le réchauffement et de l'importance des impacts potentiels dans chacun d'eux. Plusieurs modèles contiennent aussi des modules chargés d'estimer les émissions de GES futures, ainsi que le coût de leur réduction pour différentes zones économiques. C'est le cas du modèle FUND. Le module climatique servant à projeter les émissions de GES et leur coût de réduction ne sera cependant pas analysé dans ce rapport, en raison, entre autres, d'un manque de données sur les équations, et d'un manque de données sur les projections des stocks de savoir et sur les niveaux d'intervention des autorités publiques canadiennes en matières de politiques environnementales.

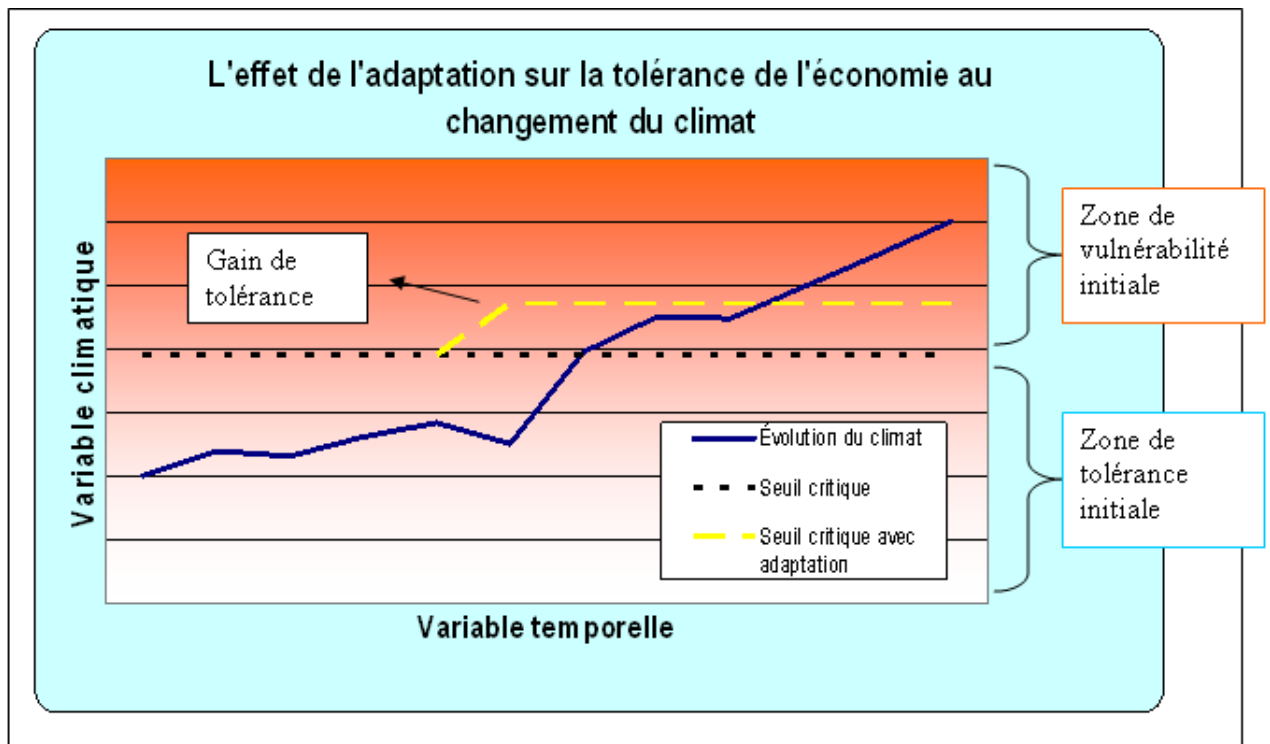
Cette partie traite des deux principaux types d'interventions publiques destinées à atténuer les dommages engendrés par le réchauffement climatique et évalue la manière dont le modèle FUND en tient compte.

6.1. Les 2 types d'interventions publiques

Il existe deux types d'interventions publiques visant à atténuer les dommages des changements climatiques. Le premier type consiste à mettre en oeuvre des mesures qui favoriseront la réduction des émissions de GES de l'économie. Certaines mesures consistent à investir dans le développement de nouvelles technologies telles la capture et la séquestration du carbone, et d'autres consistent à utiliser des mécanismes de marchés pour créer des incitatifs économiques pour divers agents économiques, tels que les industries, les entreprises et les particuliers, afin qu'ils réduisent leur niveau d'émission de GES. Les principaux mécanismes de marchés couverts en économie de l'environnement incluent la taxation de la pollution, la subvention des réductions des émissions et les permis transférables. Le deuxième type consiste à élaborer des stratégies visant à augmenter la capacité d'adaptation des différents domaines économiques au changement climatique. Selon Warren et Egginton (2008 : 29), augmenter la capacité d'adaptation d'un système permet « 1) d'atténuer les impacts actuels, 2) de réduire la sensibilité et l'exposition aux dangers du climat et 3) d'accroître la résistance aux

facteurs de stress d'ordre climatique et non climatique ». Par exemple, ériger des murs le long des côtes maritimes peut ralentir le processus d'érosion des sols; investir dans de nouvelles technologies de purification de l'eau peut accroître la capacité d'approvisionnement en eau d'une société; et développer des programmes de formation en agriculture peut accroître la capacité des fermiers à mieux orienter leur technique de production face à des températures plus chaudes, ainsi qu'aux changements de fréquence et d'intensité des précipitations. Enfin, il existe des politiques qui rejoignent les 2 types d'interventions. Par exemple, le développement de l'énergie solaire comme moyen d'approvisionnement en énergie contribue à réduire les émissions de GES et représente aussi une technologie plus efficace lorsque utilisée dans un climat plus chaud. Le graphique 3 illustre l'effet des mesures d'adaptation sur la tolérance d'une économie au changement climatique.

Graphique 3



Note : Extrait modifié tiré de Warren et Egginton (2008)

Lecocq et Shalizi (2004) décrivent les aspects communs et spécifiques aux deux types de plans d'actions. Ils sont similaires car ils tentent de réduire les dommages anticipés des changements climatiques. Dans les deux cas, le niveau d'incertitude relié aux bénéfices engendrés et aux coûts qu'ils impliquent est énorme. De plus, en raison des délais de réaction du système climatique aux variations des émissions de GES, combinés aux rigidités des systèmes socio-économiques face aux changements des structures de marchés, les deux types d'interventions doivent être mis en oeuvre immédiatement pour que les résultats escomptés puissent être observés dans le futur. Enfin, les coûts marginaux de réduction des émissions augmentent avec le niveau de réduction et le même principe s'applique aux mesures d'adaptation : les premières mesures existantes s'avèrent peu coûteuses, mais ces coûts augmentent au fur et à mesure que les mesures d'adaptations bon marché ont été mises en oeuvre. Les deux types diffèrent sous plusieurs aspects. Premièrement, ils traitent de l'incertitude reliée au changement climatique de manière différente. La réduction des émissions de GES fait diminuer la probabilité qu'il y ait des dommages dans le futur, tandis que l'adaptation contribue à réduire l'ampleur des dommages lorsque ceux-ci se manifestent. Deuxièmement, la réduction des émissions de GES engendre une diminution des risques d'impacts reliés aux changements climatiques dans tous les domaines, tandis que les mesures d'adaptations ciblent des domaines spécifiques.

Il existe un quasi-consensus à l'effet que les deux types de mesures doivent être entreprises, dépendamment du degré d'incertitude entourant les impacts. McKibbin et Wilcoxon (2003) résument bien les principales raisons qui justifient la mise en oeuvre des deux types d'interventions : « The difference between choosing between these responses to climate change is analogous to the decision to wear seat belts versus installing anti-locks breaks on a car. The anti-lock breaks help to reduce the likelihood of an accident (mitigation) whereas the seat belts help to prevent catastrophe if there is an accident (adaptation). With both options available few sensible people would choose only one or the other since they both act to minimize the risk of serious injury ».

6.2. Les traités internationaux et le problème du resquillage

Les pays qui désirent agir pour éviter le plus possible les conséquences du réchauffement climatique sont confrontés à un arbitrage entre la réduction des émissions de GES et l'utilisation de mesures d'adaptation. Cette question d'arbitrage est abondamment discutée par les experts en changements climatiques. Bien que la combinaison des deux types d'intervention soit considérée comme préférable par la majorité des experts, la réduction des émissions de GES ouvre la porte au problème du resquillage. La possibilité des pays de resquiller est causée par le fait que le réchauffement climatique est un problème de pollution globale causé par les émissions de GES provenant de sources nationales (la réduction ou l'ajout d'une tonne d'émission de CO₂ par un pays engendre les mêmes conséquences sur le niveau de concentration atmosphérique de carbone que la réduction d'une tonne dans un autre pays). Ainsi, les niveaux d'émissions des pays produisent des externalités importantes sur les autres pays. Il peut donc s'avérer avantageux pour un pays de ne pas participer à des initiatives de réduction et de bénéficier des initiatives de réduction des émissions d'autres pays sans en subir les coûts. Plus spécifiquement, les traités internationaux établis dans le but de rassembler les pays émetteurs pour qu'ils s'engagent à réduire leurs émissions, tel que le Protocole de Kyoto, comportent des lacunes causées par deux types de resquillage.⁴⁴ Le premier type de resquillage survient lorsque les firmes des pays non-signataires ont un avantage dans les marchés d'exportations des pays signataires en raison de leurs plus faibles coûts de production. Le deuxième survient lorsque les firmes des pays signataires ont des incitatifs à aller se localiser dans les pays non-signataires pour produire afin de bénéficier de plus faibles coûts de production.

Les mesures d'adaptation sont moins sujettes au problème du resquillage car elles ont la particularité de cibler des régions géographiques, des collectivités et des secteurs d'activité économique précis. Ainsi, les sommes investies dans les mesures d'adaptation bénéficient en majeure partie aux populations ciblées par les autorités publiques des pays qui les mettent en oeuvre. En général, les mesures d'adaptation comme type d'intervention pour atténuer l'ampleur des dommages potentiels des changements

⁴⁴ Voir Courchene et Allan (2008)

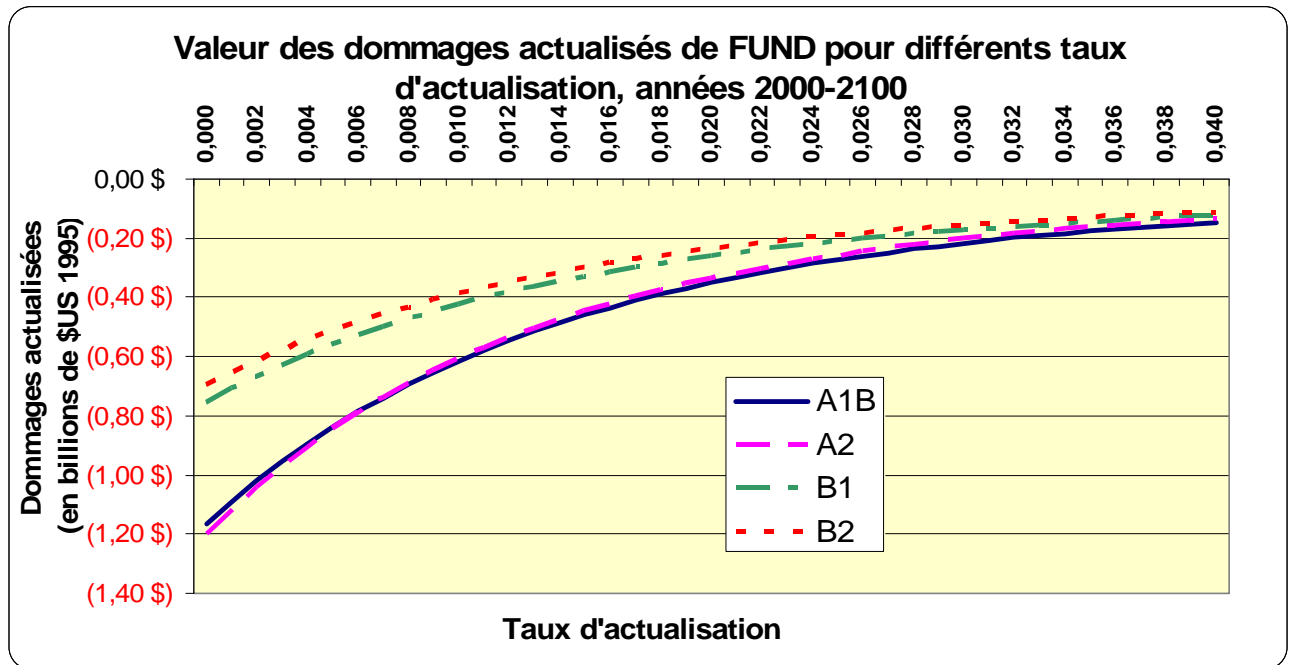
climatiques ne nécessitent donc pas la coopération des autres nations pour être soient efficaces.

7. L'équité intergénérationnelle dans le contexte des changements climatiques

Les décideurs politiques ont un défi de taille lorsqu'ils abordent le problème des changements climatiques. Les impacts du réchauffement de la planète se répercuteront sur plusieurs générations. Les modèles d'évaluation intégrés développés pour estimer les impacts économiques des changements climatiques et les coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) comportent de larges horizons temporels. Ils permettent ainsi d'effectuer des analyses coûts-bénéfices (ACB) des plans d'actions de réduction d'émissions pour contrer l'accélération du réchauffement du climat et limiter les impacts anticipés sur les générations futures.

Dans le cas des changements climatiques, la valeur du taux d'actualisation choisi présente un débat d'équité intergénérationnelle. Alors que les générations futures bénéficieront potentiellement des efforts de réduction des émissions des présentes générations, ce sont ces dernières qui en assumeront les coûts. Le taux d'actualisation utilisé pour actualiser les flux futurs estimés influence grandement les résultats et, par conséquent, les recommandations des experts sur les actions à entreprendre. Le Graphique 4 illustre la valeur des dommages actualisés du Canada avec l'utilisation de différents taux d'actualisation.

Graphique 4



Plus la valeur du taux utilisé est élevée, moins le bien-être des générations futures occupe de l'importance dans l'évaluation. Stern et al (2006) recommandent dans un ouvrage bien connu, le *Stern Review*, d'agir immédiatement pour réduire les émissions de GES. Tol et Yohe (2006) critiquent ces conclusions en affirmant que les estimations élevées des impacts des changements climatiques résultent en partie de l'utilisation d'un très faible taux d'actualisation. Le choix du taux d'actualisation dans un tel contexte pose aussi un dilemme d'ordre éthique car il reflète en partie l'importance accordée au bien-être des générations futures.

L'enjeu discuté dans cette partie porte plus particulièrement sur les arguments sous-jacents aux différents choix de taux d'actualisation pour évaluer les flux futurs des bénéfices des réductions de GES. Cette partie revoit les principales caractéristiques du cadre d'analyse de l'ACB et résume les principaux désaccords sur la détermination de la valeur du taux d'intérêt dans l'application de ce cadre à l'enjeu d'équité intergénérationnel que posent les changements climatiques.

7.1. Présentation de l'enjeu et des points de vue

L'ACB est un outil d'analyse permettant de comparer plusieurs projets d'investissements dans le but de déterminer ceux pouvant être adoptés ou privilégiés. Le critère fondamental de l'ACB stipule qu'un projet devrait être adopté s'il engendre des bénéfices ayant une valeur présente nette positive. Ce critère s'appuie sur la capacité des bénéficiaires nets du projet à compenser les perdants. Un deuxième critère de l'ACB stipule que dans le cas où les sommes à investir sont inférieures aux sommes totales pouvant être investies dans des projets à valeur présente nette positive, le portfolio optimal d'investissement devrait comprendre les projets ayant les valeurs présentes nettes les plus élevées. Il existe un large consensus à l'effet que l'enjeu d'équité intergénérationnelle que posent les changements climatiques ne respecte pas le principe de compensation sous-jacent au premier critère discuté. En pratique, concevoir un mécanisme permettant de s'assurer que les générations futures compenseront les présentes générations pour les efforts de réduction des émissions déployés est impossible.⁴⁵

Certains sont d'avis que la valeur du taux d'actualisation utilisée dans une ACB qui évalue des projets de long terme, où plusieurs générations sont concernées, ne devrait pas être celle utilisée dans une ACB conventionnelle évaluant des projets touchant une seule génération. Moore et al. (2003) soulignent que le taux d'actualisation doit diminuer au fur et à mesure que la période évaluée s'éloigne dans le temps. Ils démontrent que lorsque les intervalles de confiances des taux d'intérêts s'agrandissent avec le temps, la moyenne des facteurs d'actualisation calculée résulte en un taux plus faible. Cette preuve permet de conclure qu'il faut donner plus de poids aux générations du futur lointain, compte tenu de l'incertitude entourant leur bien-être. Stern et al. (2006) renforcent cette position. Ils sont d'avis que l'exercice d'actualisation de différents projets est généralement utilisé pour des variations marginales autour d'une même tendance. Dans le cas des changements climatiques, l'incertitude croissante entourant la tendance de la consommation future

⁴⁵ Lind (1995) et Moore et al. (2003) développent des arguments semblables. Si un mécanisme prévoyant des transferts entre générations était implanté par les présents gouvernements, il serait toujours possible pour les gouvernements ultérieurs de ne pas respecter le mécanisme de transferts.

augmente et ceci rend la technique conventionnelle d'actualisation à taux constant inappropriée. Stern et al. (2006 : 36) l'expliquent comme tel : « The discount rate is the rate of fall of the discount factor. There is no presumption that it is constant over time, as it depends on the way in which consumption grows over time. [...] If uncertainty rises as outcomes further into the future are contemplated, this would work to reduce the discount rate ».

Le problème d'équité intergénérationnel est avant tout d'ordre éthique. Les défenseurs d'un taux d'actualisation décroissant dans le temps acceptent l'utilisation de l'ACB pour traiter des enjeux éthiques. Ils sont d'avis que l'utilisation d'un taux d'actualisation dont la valeur diminue avec le temps permet d'accorder une importance similaire aux différentes générations touchées par le problème. Stern et al. (2006 : 37) l'expriment ainsi : « This approach to discounting and the ethics from which it is derived is of great importance for the analysis of climate change ». Moore et al. (2003 : 11-12) vont dans le même sens : « Discounting at a constant discount rate can pose an ethical dilemma – the use of constant discount rates much in excess of 1 percent implies that it is not efficient for society to spend even a small amount today in order to avert costly environmental disaster, provided that the disaster occurs sufficiently far into the future ».

Certains experts émettent des points vus qui divergent avec ceux précédemment décrits. Lind (1995) est d'avis que la solution au problème éthique associé aux changements climatiques ne réside pas dans l'ajustement du taux d'actualisation. Selon lui, les problèmes d'ordre éthique ne doivent pas être pris en compte dans une ACB : « Cost-benefit analysis which uses the willingness-to-pay concept as the basis for measuring benefits and costs, which in turn depends on the intergenerational and intragenerational distributions of income as a starting point, does not provide a basis for determining whether that distribution of income is equitable or whether redistribution should occur. Furthermore, this situation cannot be solved by tinkering with the discount rate » (1995 : 383). Il poursuit en affirmant que l'utilisation d'un taux d'actualisation plus faible peut mener à l'adoption de projets ayant des rendements en deçà du taux de rendement de

marché, et que les générations futures risqueraient d'être privées des bénéfices de projets ayant de bon taux de rendement. Il questionne aussi la manière de déterminer la valeur du taux d'actualisation, étant donné que les gens n'ont pas tous des taux de préférences intertemporels semblables.

Dans le contexte précis des changements climatiques, plusieurs experts affirment qu'il est illogique de penser que de diminuer le taux d'intérêt en deçà du taux de rendement du capital permette une meilleure prise en compte du bien-être des générations futures. Étant donné que de nombreuses projections économiques prédisent une croissance soutenue de la production mondiale et des niveaux de revenus par habitant, il serait inéquitable d'accorder une importance égale aux générations futures étant donné que celles-ci auront un niveau de bien-être nettement supérieur. Une citation de Lind (1995 : 384) exprime bien ce point de vue : « Can we justify current generations sacrificing 2-3% of GWP to increase the wealth of future generations who even after deduction for the high damage scenario are 2-15 times richer than the present generation? The answer is clearly no on the basis of intergenerational equity ». Byatt et al (2006) reprennent sensiblement les mêmes propos et renchérissent en affirmant que d'aussi bas taux d'actualisation dicteraient une augmentation considérable de l'épargne. Cette situation mènerait à négliger les problèmes de pauvreté qui sévissent présentement dans le monde.

8. Évaluation critique

Cette partie contient une analyse critique du modèle FUND. En premier lieu, il sera évalué dans quelle mesure les résultats du modèle pour les domaines économiques couverts reflètent les conclusions des recherches effectuées à l'échelle canadienne. Puis, il sera discuté des aspects à améliorer dans la manière dont FUND modélise l'adaptation et des aspects à améliorer. Enfin, un point de vue sera émis quant aux éléments à prendre en compte pour utiliser l'analyse coûts-bénéfices afin d'évaluer les politiques environnementales liées aux changements climatiques.

8.1. Le situation canadienne dans le modèle FUND

Le modèle FUND omet plusieurs domaines économiques qui seront affectés par les changements climatiques. Les principaux sont les pêches, le tourisme, les mines, le transport, la production d'énergie, les parcs et les zones protégés, les collectivités, ainsi que les infrastructures. De plus, le modèle ne tient pas compte des opportunités économiques que présenteront les nouvelles voies maritimes navigables dans le Nord. Enfin, il n'existe aucunes interactions entre les domaines économiques de FUND, ce qui ne reflète pas les conclusions des études canadiennes.

Dans les domaines où des résultats ont été estimés, les tendances ne reflètent pas toujours les conclusions des études nationales. Les domaines de l'agriculture et de la foresterie présentent tous les deux des bénéfices croissants avec le temps. Les fonctions de dommage utilisées omettent cependant les dommages que pourraient subir les cultures agricoles dus à l'augmentation des intempéries et des sécheresses. Le modèle omet les dommages pouvant être causés par l'augmentation des feux de friches. De plus, les dommages dans le domaine des écosystèmes découlent de la volonté à payer des individus pour une biodiversité. Ils sont modélisés de telle sorte qu'ils augmentent avec l'augmentation du revenu par habitant. La fonction de dommage omet donc les principaux aspects du rôle des écosystèmes dans l'économie, ne serait-ce que pour mentionner la disponibilité en ressources alimentaires pour les communautés du Nord du Canada.

La différence majeure entre les conclusions des études canadiennes et le modèle FUND se situe dans le domaine de la santé humaine. Alors que Séguin et Berry (2008) prédisent de lourdes pertes économiques dans le domaine, le modèle FUND prédit des gains économiques importants. Ce sont d'ailleurs ces gains qui mènent le modèle à conclure que le Canada serait un gagnant net du réchauffement du climat. Cette divergence mine considérablement la crédibilité du modèle.

8.2. La modélisation de l'adaptation dans le modèle FUND

Le modèle FUND modélise l'adaptation de plusieurs manières. Par exemple, dans le domaine de l'agriculture, la fonction de dommage estimant les impacts dus au taux de changement du climat tient compte de la vitesse d'adaptation des fermiers. Dans le domaine de la consommation d'énergie, la vulnérabilité du Canada au changement du climat diminue lorsque l'indice de l'amélioration de l'efficacité énergétique autonome augmente. Dans le domaine des ressources en eau, un paramètre tient compte du progrès technologique dans l'offre et la demande en eau. Pour d'autres fonctions de dommage, la calibration des paramètres régionaux tient compte de la capacité d'adaptation des différentes régions (Warren et al, 2006, p.3). Dans la plupart de ces fonctions, la valeur du paramètre régional représente la variation repère de l'impact pour une variation donnée de la température (ou du niveau de la concentration atmosphérique de carbone) et les régressions effectuées pour obtenir cette valeur tiennent parfois compte de la capacité d'adaptation. Bien que le modèle inclut certaines composantes reliées à l'adaptation, le rapport de recherche élaboré par Warren et al. (2006) faisant l'analyse des principaux modèles d'évaluation intégrés, souligne que plusieurs experts du domaine jugent que le modèle traite de l'adaptation de manière inadéquate. L'une des raisons évoquées est que l'hypothèse de base sur laquelle l'adaptation est modélisée dans FUND suppose que les marchés efficaces produisent un processus d'adaptation efficace. Cette hypothèse peut s'avérer fausse car plusieurs décisions d'investissements reliées à l'adaptation peuvent être inefficaces, compte tenu du haut degré d'incertitude des transformations climatiques qu'engendrera le réchauffement climatique.

Le modèle tient aussi compte des niveaux de revenus par habitant pour évaluer la capacité d'adaptation de l'économie canadienne. Cet élément permet de tenir compte d'une dimension importante de la théorie économique des changements climatiques. Cependant, plusieurs indicateurs de la capacité d'adaptation tels que le niveau de répartition de la richesse, le niveau de scolarité, la densité de la population, ainsi que l'importance des dépenses des institutions publiques dans l'économie ne sont pas pris en compte.

8.3 L'analyse coûts-bénéfices appliquée aux changements climatiques

Étant donné que le réchauffement climatique est un problème de pollution irréversible ayant des impacts sur l'ensemble de la planète, le cadre de l'ACB appliqué dans le contexte des changements climatiques devrait idéalement inclure la dimension éthique dans son évaluation. Une ACB qui traite de l'enjeu devrait traiter de l'équité intergénérationnelle en tenant compte des probables croissances futures de la richesse et de l'incertitude et en évaluant l'ensemble des répercussions que les changements climatiques peuvent engendrer. Aussi, ce traitement devrait être appliqué à plusieurs scénarios de croissances économiques afin de tenir compte des différentes mutations sociopolitiques et économiques possibles que réserve l'avenir.

Tout d'abord, il est primordial pour toute ACB tenant compte de l'équité intergénérationnelle de considérer les niveaux futurs de revenu par habitant et de répartition de la richesse pour mieux tenir compte de l'augmentation du bien-être des générations futures découlant du progrès technologique et de l'augmentation de la production. Le modèle FUND utilise des projections sur les niveaux de revenus par habitant des pays selon plusieurs scénarios socio-économiques. Ces scénarios devraient par contre aussi inclure des données sur les niveaux de répartition de la richesse. Tol et al. (2004) évaluent les questions distributionnelles et affirment que les populations les plus vulnérables aux changements climatiques seront les plus pauvres. Dans un avenir où l'écart entre les riches et les pauvres s'accroîtrait, il serait inapproprié d'affirmer que la

croissance économique engendre une augmentation de bien-être uniforme à travers les pays et les générations.

En plus d'inclure les interactions susceptibles de se produire entre les domaines économiques, le modèle FUND devrait inclure les risques potentiels de catastrophes naturelles majeures que les changements climatiques pourraient engendrer. Les risques les plus couramment évoqués dans la littérature incluent l'effondrement de la calotte glaciaire de l'Antarctique et l'interruption de la circulation thermohaline. Bien qu'il soit peu probable que ces événements se produisent, il n'en demeure pas moins que les impacts qui en résulteraient seraient catastrophiques. De telles possibilités, souvent banalisées par les experts plus sceptiques, doivent être prises en compte pour que l'ACB effectuée soit rigoureuse.

Finalement, l'avenir étant incertain, il est primordial d'ajuster une ACB pour qu'elle puisse tenir compte de l'agrandissement des intervalles de confiance dans le long terme. Les taux d'actualisation utilisés pour estimer les impacts sur les périodes futures doivent tenir compte de cette incertitude. La valeur du taux de préférence intertemporel varie selon les individus car ceux-ci valorisent le présent et le futur de manière différente. Pour cette raison, une ACB devrait inclure plus d'une valeur et appliquer des analyses de sensibilité pour évaluer l'influence de la valeur du taux d'actualisation sur les impacts estimés.

9. Conclusion

Le modèle FUND fournit beaucoup d'information sur les facteurs socio-économiques qui influencent les impacts économiques des changements climatiques. Il permet de donner un aperçu des bénéfices et des dommages potentiels que pourrait engendrer le réchauffement du climat. La majorité des composantes des fonctions de dommage sont décrites avec précision, et les données des variables nécessaires pour calculer les impacts sont facilement accessibles pour la région canadienne. La documentation consacrée à la description du modèle omet cependant plusieurs informations importantes, en particulier les méthodologies utilisées pour estimer les paramètres régionaux.

Le modèle FUND contient seize régions couvrant presque tous les pays du monde. Ceci permet de fournir aux analystes des changements climatiques une vue globale de la distribution des impacts dans le monde et des défis environnementaux et économiques à relever. Au niveau de la région du Canada, le modèle omet cependant d'importants aspects. Tout d'abord, de nombreux domaines ne sont pas couverts. Puis, certains domaines couverts omettent des facteurs économiques susceptibles de jouer un rôle important. Enfin, les résultats de certains domaines couverts contredisent les conclusions de rapports élaborés par les experts nationaux. Pour ces raisons, le modèle FUND est d'une utilité limitée pour des fins d'analyse de politiques environnementales visant à atténuer les impacts négatifs des changements climatiques au Canada.

Les développements de la science économique dans le domaine des changements climatiques sont relativement récents. Les communautés des milieux scientifiques et économiques devront acquérir davantage de connaissances sur le sujet pour développer un cadre d'analyse quantitatif permettant d'orienter les décisions publiques sur les politiques à mettre en œuvre.

Annexes

Annexe 1 : Régions et pays du modèle FUND

Régions	Pays
États-Unis	États-Unis
Canada	Canada
Europe de l'ouest	Andorre, Autriche, Belgique, Chypre, Danemark, Finlande, France, Allemagne, Grèce, Islande, Irlande, Italie, Liechtenstein, Luxembourg, Malte, Monaco, Hollande, Norvège, Portugal, Saint-Marin, Espagne, Suède, Suisse, Royaume-Uni
Asie Pacifique	Japon, Corée du sud
Océanie	Australie et Nouvelle-Zélande
Europe centrale et de l'est	Albanie, Bosnie-Herzégovine, Bulgarie, Croatie, République Tchèque, Hongrie, Macédoine, Pologne, Roumanie, Slovaquie, Slovénie, Yougoslavie
Anciens états de l'union soviétique	Arménie, Azerbaïdjan, Biélorussie, Estonie, Géorgie, Kazakhstan, Lettonie, Lituanie, Moldavie, Russie, Tadjikistan, Turkménistan, Ukraine, Ouzbékistan
Moyen-Orient	Bahreïn, Iran, Iraq, Israël, Jordanie, Koweït, Liban, Oman, Qatar, Arabie saoudite, Syrie, Turquie, Émirats arabes unis, Bande de Gaza, Yémen
Amérique centrale	Belize, Costa rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Mexique, Nicaragua, Panama
Amérique du sud	Argentine, Bolivie, Brésil, Chili, Guyane française, Guyane, Paraguay, Pérou, Surinam, Uruguay, Venezuela
Asie du sud	Afghanistan, Bangladesh, Bhutan, Inde, Népal, Pakistan, Sri lanka
Asie du sud-est	Brunei, Cambodge, Timor orientale, Indonésie, les Laotiens, Malaisie, Myanmar, Papouasie Nouvelle Guinée, Philippines, Singapour, Taiwan, Thaïlande, Vietnam
Chine et plus	Chine, Hong Kong, Corée du Nord, Macao, Mongolie
Nord de l'Afrique	Algérie, Égypte, Libye, Maroc, Tunisie, Sahara occidental
Afrique subsaharienne	Angola, Bénin, Botswana, Burkina Faso, Burundi, Cameroun, Cap Vert, République centrafricaine, Tchad, Congo Brazzaville, Congo Kinshasa, d'Ivoire de Cote, Djibouti, Guinée équatoriale, Érythrée, Éthiopie, Gabon, Gambie, Ghana, Guinée, Guinée-Bissau, Kenya, Lesotho, Libéria, Madagascar, Malawi, Mauritanie, Mozambique, Namibie, Niger, Nigeria, Rwanda, Sénégal, Sierra Leone, Somalie, Afrique du Sud, Soudan, Swaziland, Tanzanie, Togo, Ouganda, Zambie, Zimbabwe
Petits états insulaires	L'Antigua et le Barbuda, Aruba, Bahamas, Barbade, Bermudes, Les Comores, Cuba, Dominique, République Dominicaine, Fiji, français Polynésie, Grenada, Guadeloupe, Haïti, Jamaïque, Kiribati, Les Maldives, Les Îles Marshall, la Martinique, Îles Maurice, Micronésie, Nauru, Antilles néerlandaises, Nouvelle-Calédonie, Palau, Porto Rico, la Réunion, Samoa, Sao-Tomé-et-Principe, Seychelles, Îles Salomon, rue Kitts et Nevis, St Lucia, St Vincent et grenadines, Tonga, Trinité-et-tobago, Tuvalu, Vanuatu, Îles Vierges

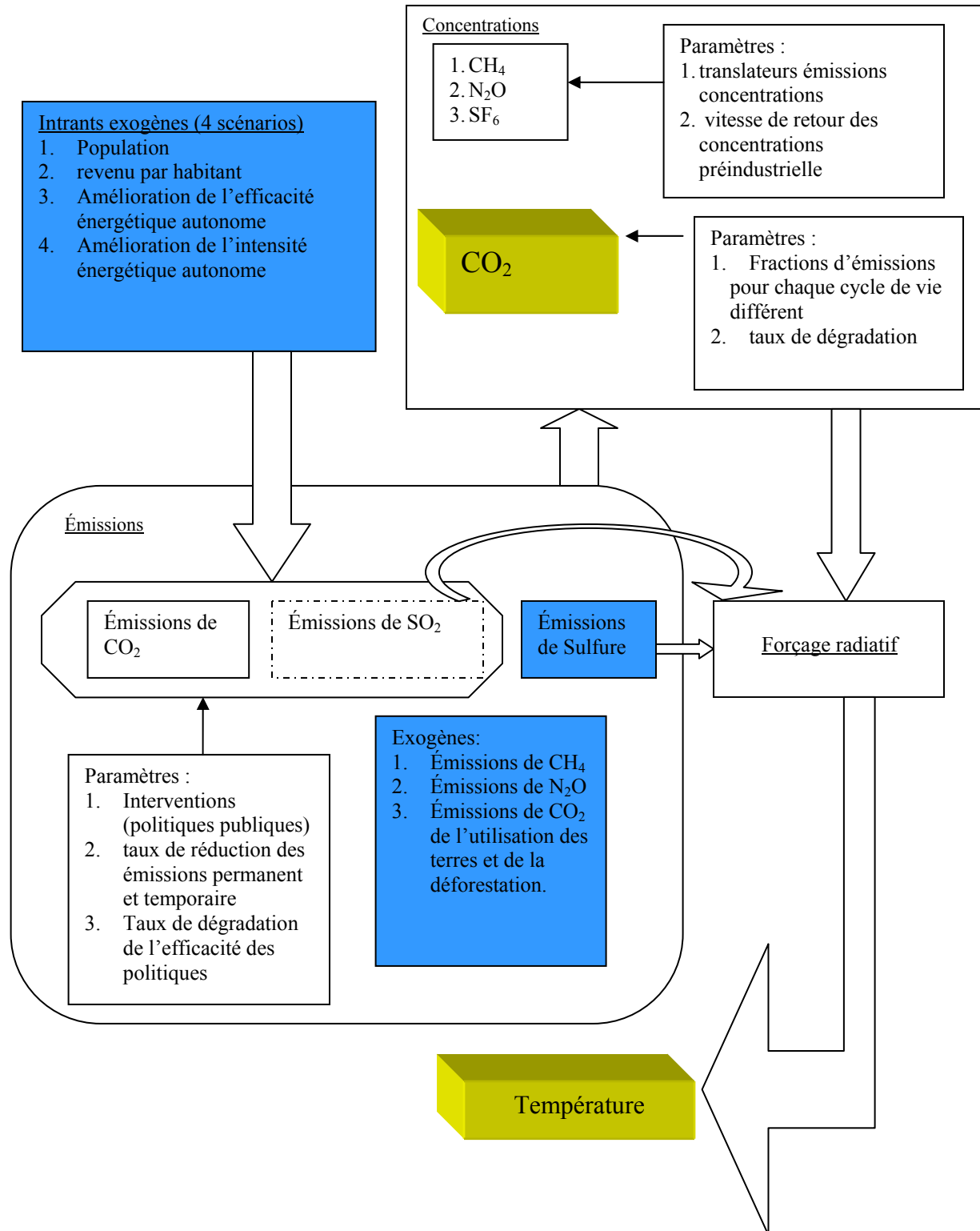
Source : Anthoff, D and Richard S.J. Tol, the Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND), Tables, Version 3.3, Hamburg University. 2008.
Liens html: <http://www.fnu.zmaw.de/fileadmin/fnu-files/staff/tol/FundTechnicalTables.pdf>

Annexe 2 : Description des scénarios socio-économiques du modèle FUND

Scénarios	Description
A1	Le canevas et la famille de scénarios A1 décrivent un monde futur caractérisé par une croissance économique très rapide, une population mondiale qui atteint son maximum au milieu du siècle pour diminuer ensuite et l'apparition rapide de technologies nouvelles et plus efficaces. Les principaux thèmes sous-jacents sont la convergence entre les régions, le renforcement des capacités et l'accroissement des interactions culturelles et sociales, conjugués à une réduction sensible de la disparité régionale du revenu par habitant. La famille de scénarios A1 se divise en trois groupes qui correspondent à différentes hypothèses concernant l'évolution technologique du système énergétique. Les trois groupes A1 se distinguent par leur orientation technologique : usage intensif de combustibles fossiles (A1F1), sources d'énergie autres que fossiles (A1T) et équilibre entre toutes les sources d'énergie (A1B) (la notion d'équilibre fait référence à une situation où l'on ne recourt pas de façon excessive à une source d'énergie particulière, en admettant que toutes les technologies propres à l'approvisionnement énergétique et à l'utilisation finale se perfectionnent à un rythme similaire).
A2	Le canevas et la famille de scénarios A2 décrivent un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les taux de fécondité régionaux convergent très lentement, ce qui se traduit par une augmentation constante de la population. Le développement économique obéit principalement à une orientation régionale, et la croissance économique par habitant comme le progrès technologique sont plus fragmentés et plus lents que dans les autres canevas.
B1	Le canevas et la famille de scénarios B1 décrivent un monde convergent doté des mêmes caractéristiques démographiques, la population mondiale atteignant son maximum au milieu du siècle pour diminuer ensuite (comme dans le canevas A1), mais avec une évolution rapide des structures économiques vers une économie axée sur les services et l'information, une moindre importance des activités productrices de matières et l'adoption de technologies propres et fondées sur une utilisation efficace des ressources. L'accent est mis sur la recherche de solutions mondiales en matière de viabilité économique, sociale et environnementale, y compris par le biais d'une plus grande équité, mais sans nouvelles initiatives ayant trait au climat.
B2	Le canevas et la famille de scénarios B2 décrivent un monde où l'accent est mis sur des solutions locales en matière de viabilité économique, sociale et environnementale. Ce monde se caractérise par une population mondiale qui augmente régulièrement – quoique à un rythme plus lent que dans le canevas A2 –, par un développement économique de niveau intermédiaire et par un progrès technologique moins rapide et plus divers que dans les canevas A1 et B1. Ce scénario est également axé sur la protection de l'environnement et l'équité sociale et privilégie l'approche locale et régionale.

Source : *Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC)*, Troisième rapport d'évaluation du GIEC, Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques, liens HTML : http://www.grida.no/climate/IPCC_tar/vol4/french/099.htm

Annexe 3 : Représentation graphique du module climatique du modèle FUND



Source : Construction visuelle du module climatique de FUND par Alexandre Drzymala

Annexe 4 : Impacts régionaux canadiens des changements climatiques

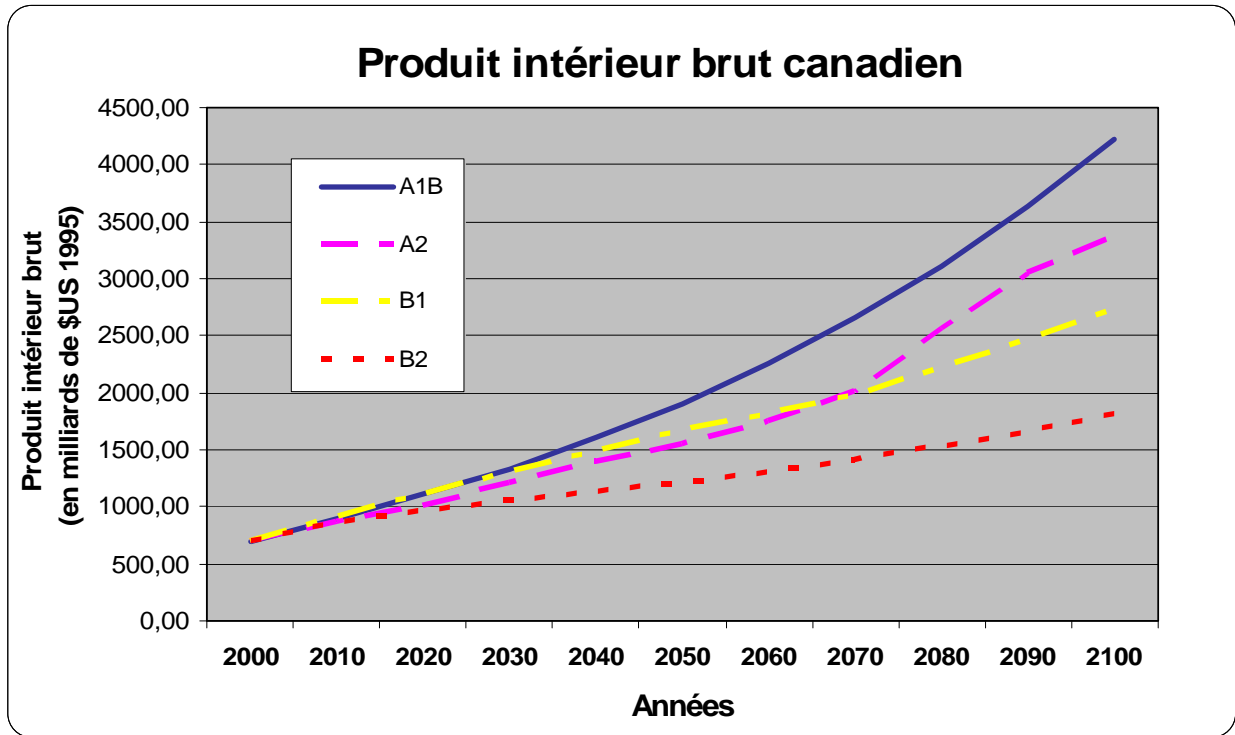
Régions	Impacts régionaux canadiens des changements climatiques
L'atlantique	<ul style="list-style-type: none"> • L'augmentation du nombre et de l'intensité des tempêtes, l'érosion côtière et les inondations affecteront les collectivités et les infrastructures. • L'élévation du niveau de la mer créera une plus grande rareté des ressources en eau potable. • Les températures plus élevées et l'allongement des saisons vont bénéficier les secteurs de l'agriculture et de la foresterie. • Les écosystèmes terrestres seront touchés négativement. • Les écosystèmes marins seront affectés par les températures de l'eau et l'érosion, ce qui affectera négativement l'industrie de la pêche.
Le Québec	<ul style="list-style-type: none"> • L'infrastructure de l'arctique québécois et le mode de vie traditionnel seront affectés. • Les écosystèmes subiront des chocs importants. • Les secteurs de l'hydroélectricité et de la foresterie bénéficieraient des changements climatiques. • L'érosion côtière le long du fleuve St-Laurent créera des pertes économiques dans les secteurs d'activités touristiques. • L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes augmentera les risques pour les infrastructures et les populations vulnérables. • L'augmentation de la productivité agricole et la baisse de la demande énergétique représenteront des bénéfices importants.
L'Ontario	<ul style="list-style-type: none"> • Les changements climatiques affecteront négativement les systèmes de traitement et de distribution de l'eau, les équipements de production et de distribution de l'énergie et le réseau de transport. • Les pénuries d'eau constatées augmenteront avec la hausse de la température. • Les conditions extrêmes telles que les vagues de chaleur et les épisodes de smog augmenteront les troubles de santé de la population vieillissante. • Les changements écologiques favoriseront la propagation des maladies à transmission vectorielle. • Les communautés du nord ontarien souffriront d'évacuations répétées. • Les écosystèmes seront affectés négativement. • La baisse du niveau d'eau dans les Grands Lacs diminuera la production hydroélectrique. • Les pénuries d'eau seront plus fréquentes.
Les prairies	<ul style="list-style-type: none"> • Les pénuries d'eau menacent le système d'irrigation dans le secteur agricole. • Les écosystèmes subiront des conséquences au niveau des insectes, des incendies et de l'implantation d'espèces exotiques. • Les avantages que procuraient les hivers froids disparaîtront lorsque la population de ravageurs augmentera. • Les hivers moins longs faciliteront les travaux hivernaux de l'industrie forestière et du secteur énergétique. • L'utilisation moins efficace des chemins d'hiver augmentera les coûts de transport. • L'augmentation des épisodes de sécheresse, des feux de friche et des inondations graves engendrera des coûts importants. • Les étés plus longs et plus chauds favoriseront l'industrie du tourisme dans les parcs nationaux.

La Colombie-Britannique	<ul style="list-style-type: none"> • Les pénuries d'eau seront plus fréquentes. • Les phénomènes extrêmes et les catastrophes naturelles auront une incidence sur la longévité des infrastructures et toucheront les collectivités ainsi que les industries. • L'industrie forestière sera affectée négativement par les infestations de ravageurs et les feux de forêts. • Le secteur des pêches subira des stress importants. • Les périodes de récoltes seront plus longues mais les sécheresses seront plus fréquentes, longues et intenses.
Le Canada	<ul style="list-style-type: none"> • Les maladies sévissant sous les climats plus chauds vont menacer la santé de la population en raison du transport de maladies et de vecteurs. • L'augmentation de la productivité de l'épinette et du peuplier au Québec et l'allongement de la saison de croissance des cultures représenteront des avantages. • Les variations dans la demande énergétique seront bénéfiques en hiver et coûteuses en été. • Les changements dans les activités d'aide, du maintien de la paix, de la sécurité et de l'immigration poseront des défis. • L'accroissement du tourisme lors de la saison chaude augmentera les revenus des industries dépendantes et la baisse du tourisme dans les attractions hivernales créera des pertes. • Les canadiens voyageront moins vers les destinations chaudes. • Les exportations de céréales et de maïs pourraient trouver de nouveaux marchés et les importations de fruits et légumes pourraient diminuer.

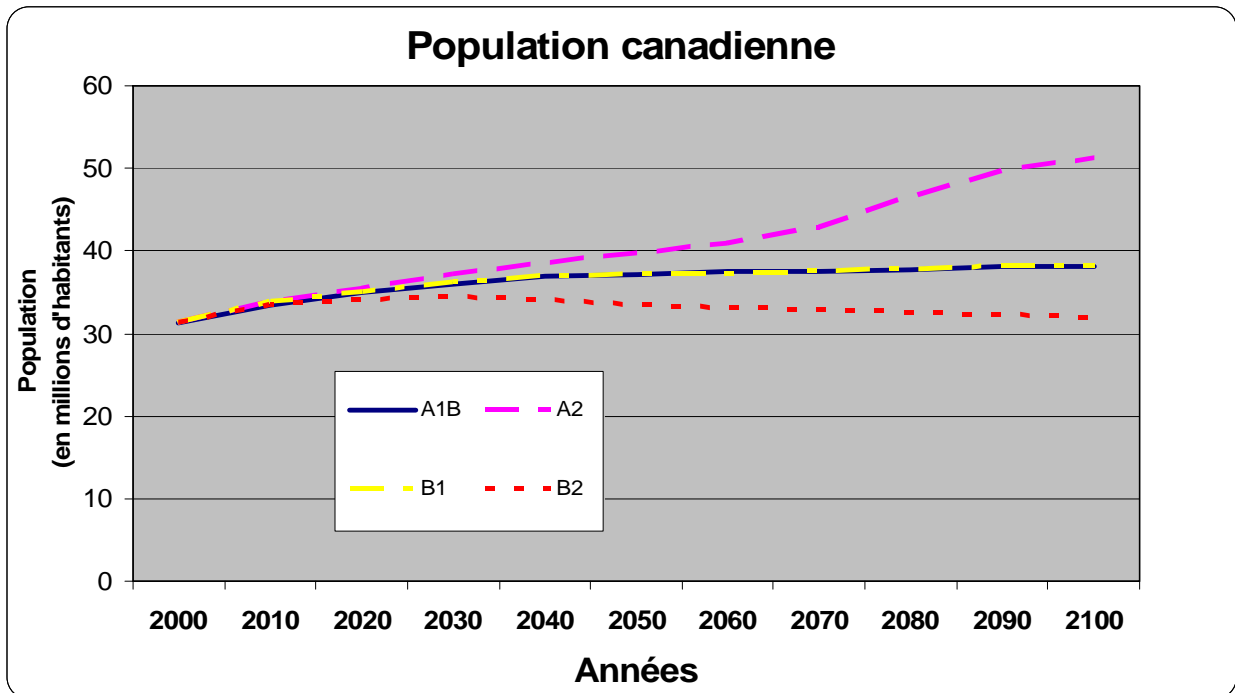
Source : Compilation des impacts du rapport *Vivre avec les changements climatiques: édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 171-226.

Annexe 5 Illustrations graphiques des principales variables intrants du modèle FUND

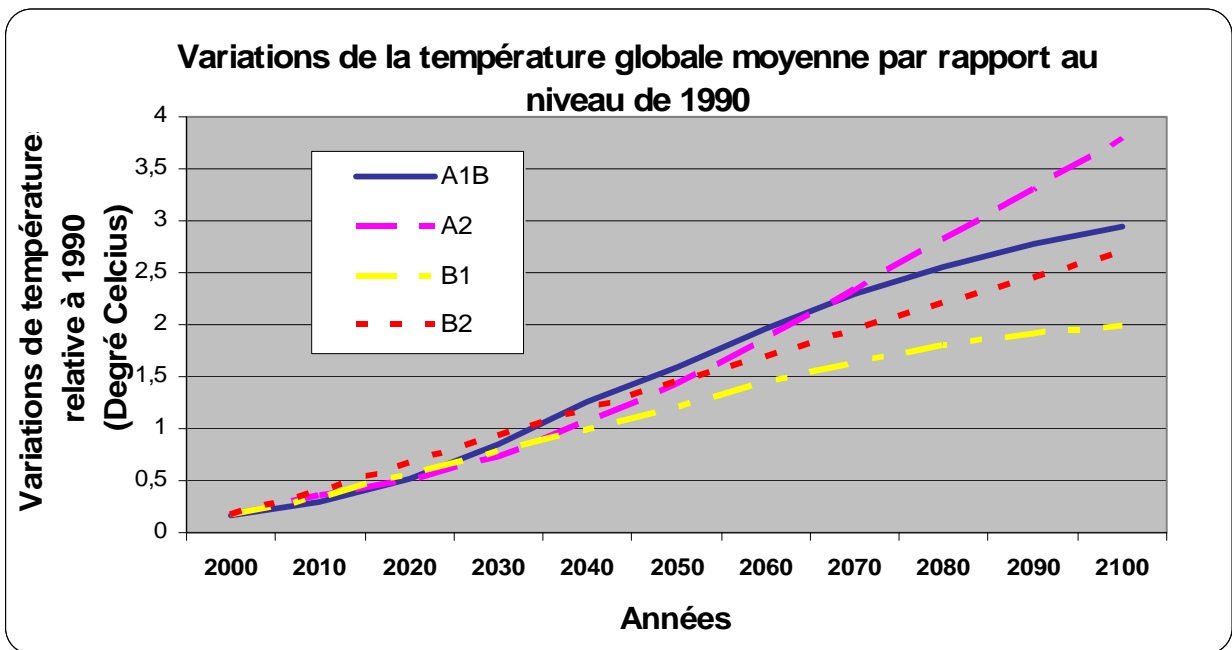
Annexe 5.1 : Projections du produit intérieur brut canadien



Annexe 5.2 : Projections de la population canadienne

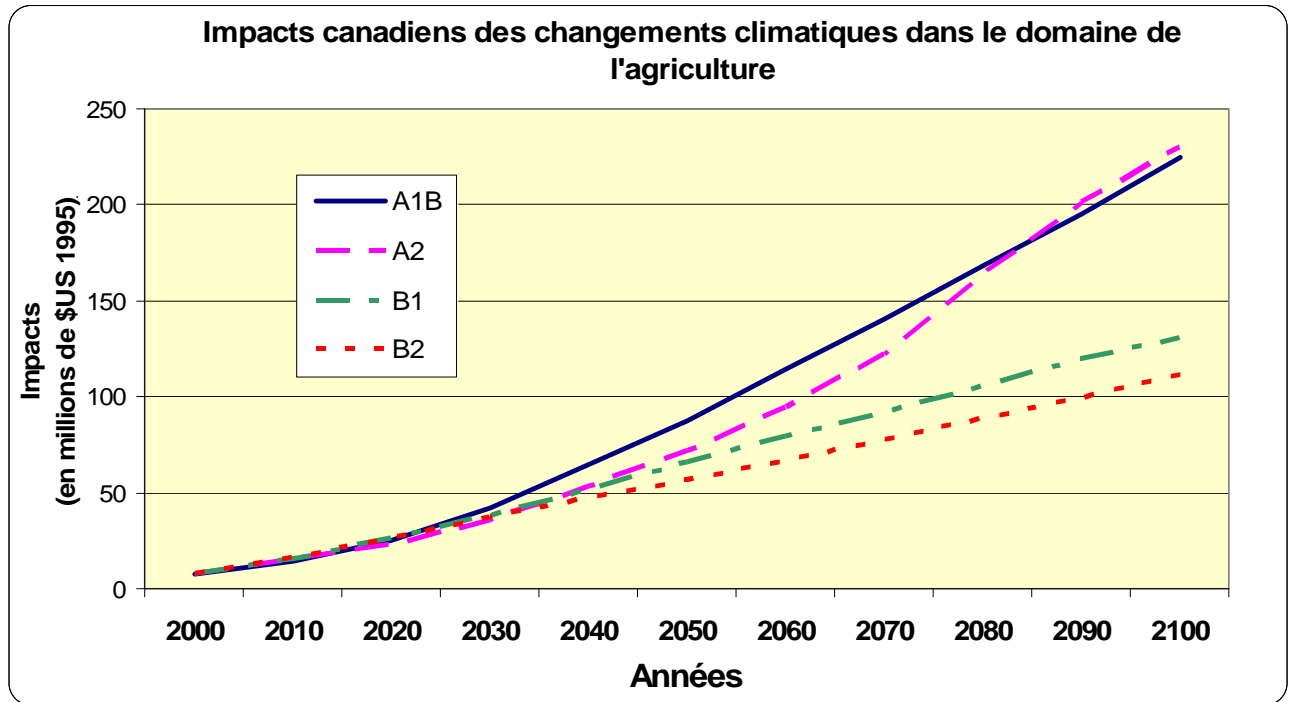


Annexe 5.3 : Projections du changement du climat

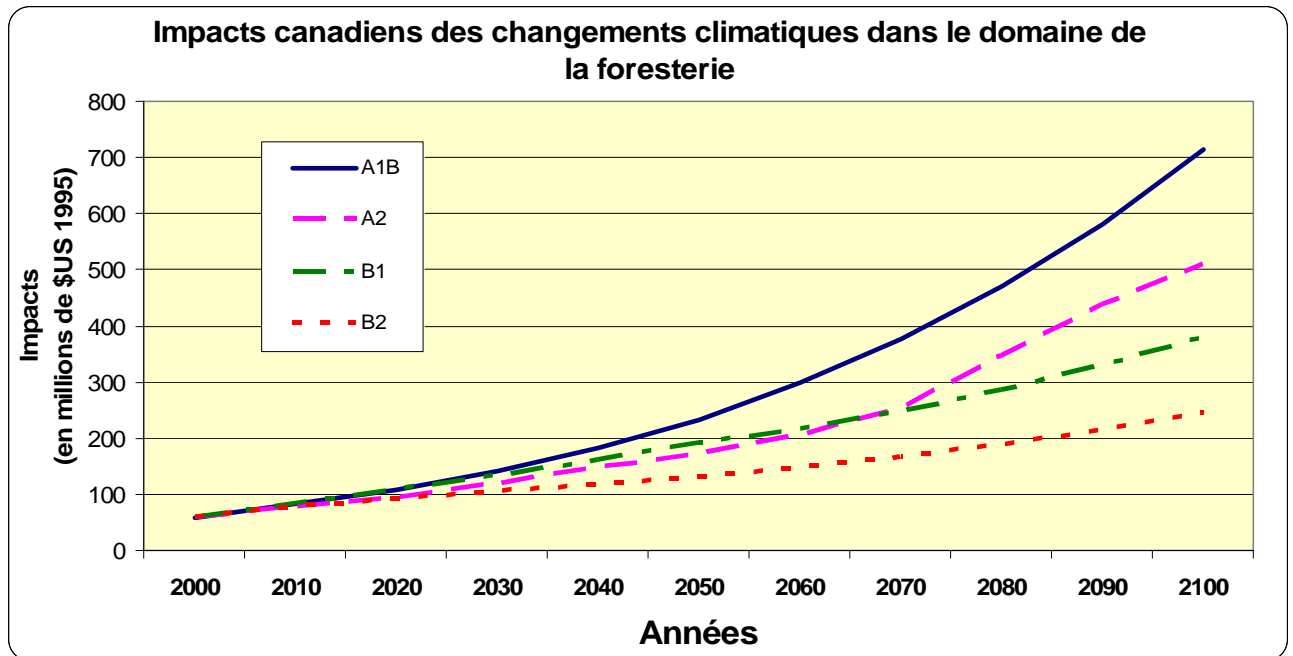


Annexe 6 : Illustrations graphiques des impacts canadiens des changements climatiques

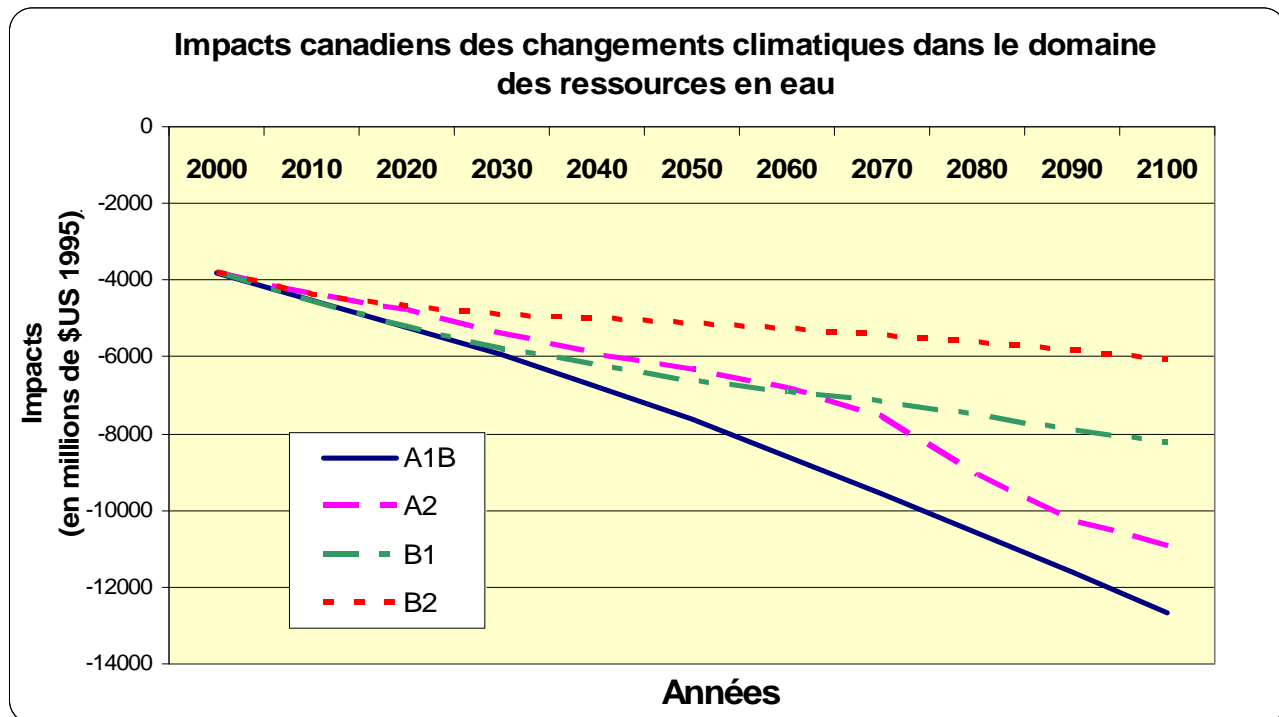
Annexe 6.1 : L'agriculture



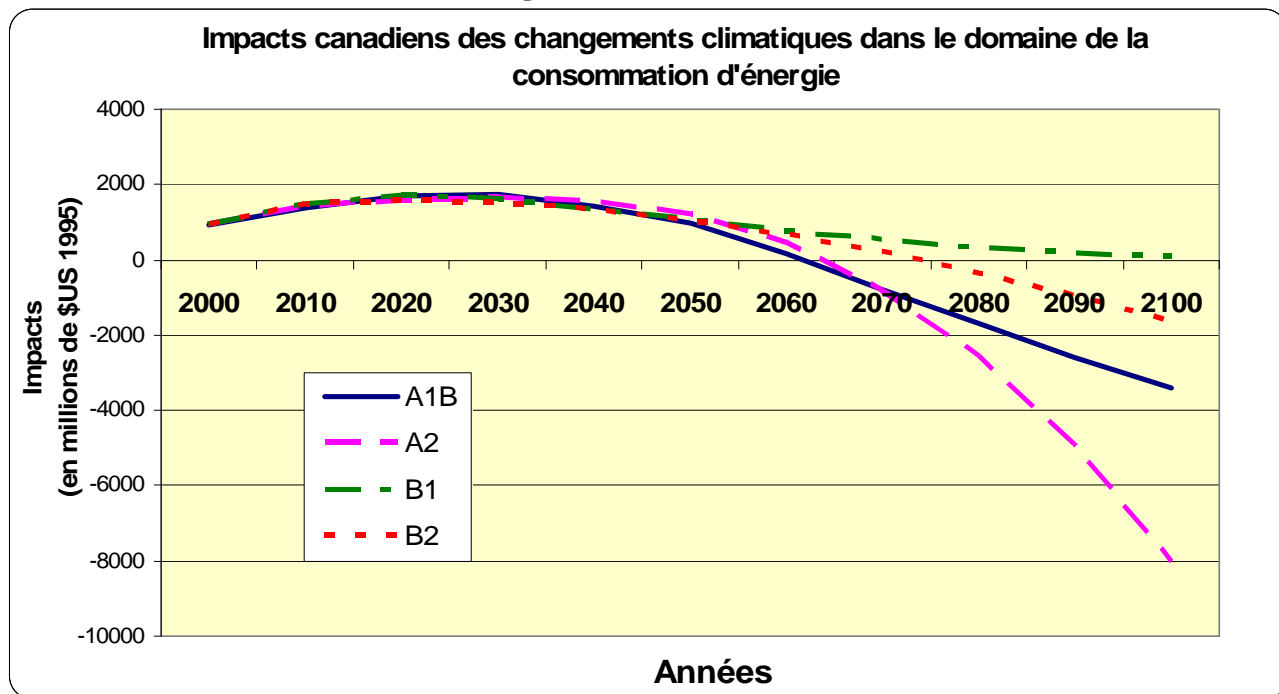
Annexe 6.2 : La foresterie



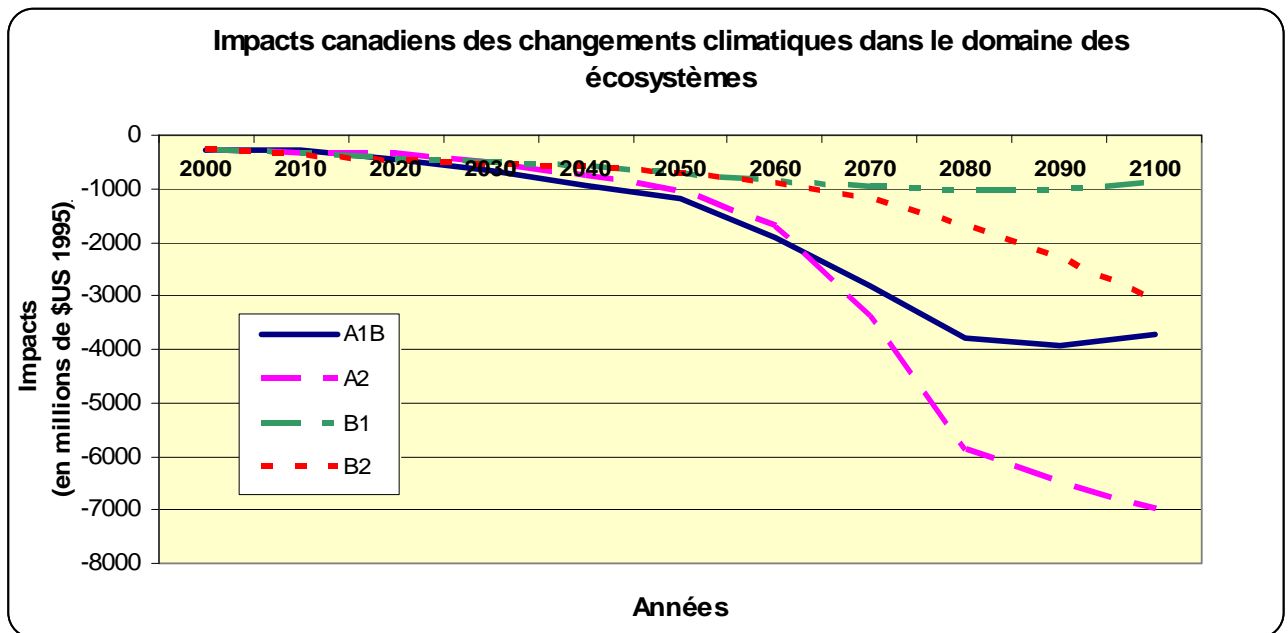
Annexe 6.3 : Les ressources en eau



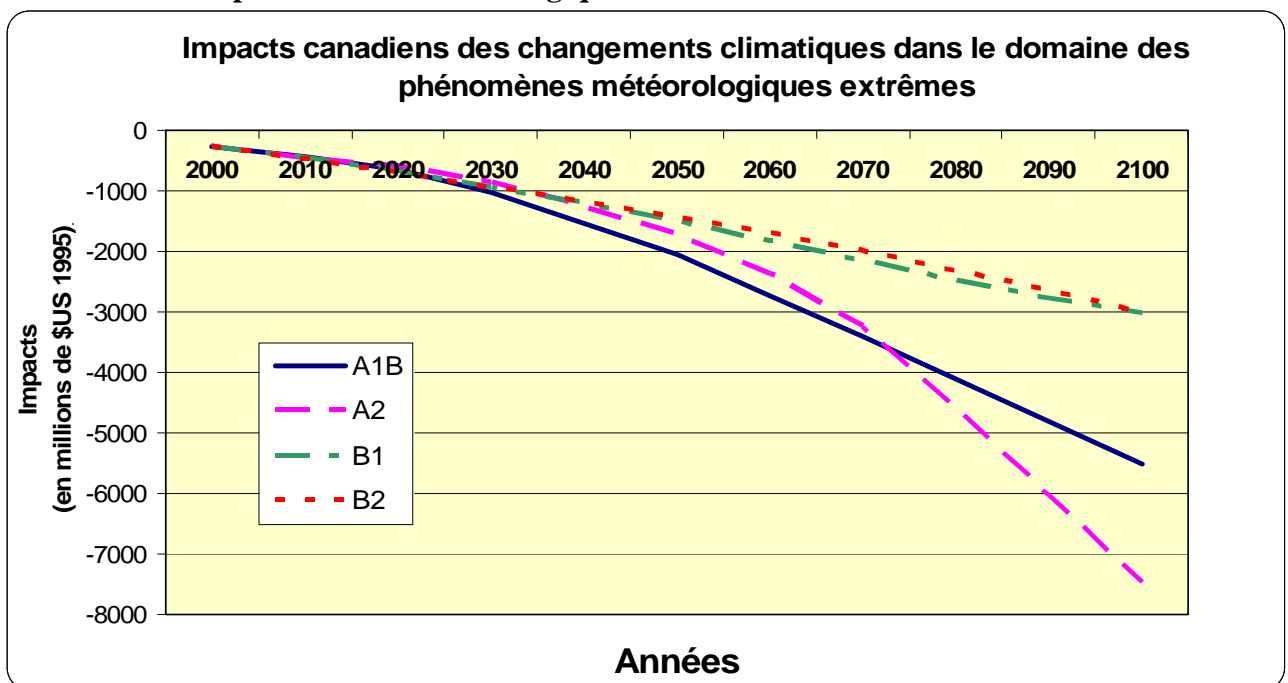
Annexe 6.4 : La consommation d'énergie



Annexe 6.5 : Les écosystèmes



Annexe 6.6 : Les phénomènes météorologiques extrêmes



Bibliographie

Anthoff, D and Richard S.J. Tol, the Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND), Technical description, Version 3.3, Hamburg University. 2008, en ligne
html: <http://www.fnu.zmaw.de/fileadmin/fnu-files/staff/tol/FundTechnicalDescription.pdf>

Byatt, I., I. Castles, I. M. Goklany, D. Henderson, N. Lawson, R. McKittrick, J. Morris, A. Peacock, C. Robinson and R. Skidelsky (2006). "The Stern Review: A Dual Critique – Part II: Economic Aspects." *World Economics* 7(4): 199-229.

Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York. 1032 pp.

Courchene, Thomas J. and John R. Allan (2008), "Climate Change: The Case for a Carbon Tariff Tax," *Policy Options* (Mars), 59-64.

Cline, W. R. (1992), *The Economics of Global Warming*. Washington, D.C.: Institute for International Economics.

Stern, N. (2007). *Stern Review: The Economics of Climate Change*, HM Treasury, London.

Darwin, R. F., M. Tsigas, J. Lewandrowski and A. Raneses (1995), *World Agriculture and Climate Change – Economic Adaptations*, 703. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, pp. 1–86.

Darwin, R. F. M. Tsigas, J. Lewandrowski and A. Raneses (1996), "Land Use and Land Cover in Ecological Economics", *Ecological Economics*.

David Kelly and Charles Kolstad, "Integrated Assessment Models for Climate Change Control," Ch 4, pp 171-97 in H. Folmer and T. Tietenberg (Eds.), *International Yearbook of Environmental and Resource Economics 1999/2000: A Survey of Current Issues* (Edward Elgar, Cheltenham, UK, 1999).

Downing, T. E., Eyre, N., Greener, R., & Blackwell, D. (1996), *Projected Costs of Climate Change for Two Reference Scenarios and Fossil Fuel Cycles*, Environmental Change Unit, Oxford.

Emergency events database (septembre 2008), en ligne
www.emdat.be

Environnement Canada, 1998, Volume sectoriel national, Étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique, 1998.

Fischer, G., K. Frohberg, M. L. Parry and C. Rosenzweig (1993), "Climate Change and World Food Supply, Demand and Trade", in Y. Kaya, N. Nakicenovic, W. D. Nordhaus and F. L. Toth, eds., *Costs, Impacts and Benefits of CO₂ Mitigation*, pp. 133–152.

Fischer, G., K. Frohberg, M. L. Parry and C. Rosenzweig (1996), "Impacts of Potential Climate Change on Global and Regional Food Production and Vulnerability", dans T. E. Downing, ed., *Climate Change and World Food Security*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 115–159.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). *Bilan 2001 des changements climatiques : rapport de synthèse (en ligne)*, troisième rapport d'évaluation du GIEC, Genève, Suisse, 2001 (consulté en octobre 2008).

http://www.grida.no/publications/other/ipcc%5Ftar/?src=/climate/ipcc_tar/

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). *Climate Change 2007, The Physical Science Basis (PDF)* (en ligne), 2007 (consulté en octobre 2008), S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor et H. L. Miller (éd.), contribution du groupe de travail I au Quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis.

http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (septembre 2008), en ligne http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.htm

Kane, S., J. M. Reilly and J. Tobey (1992), "An Empirical Study of the Economic Effects of Climate Change on World Agriculture", *Climate Change* 21, 17–35.

Lemmen, D.S. et F.J. Warren. Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne, Gouvernement du Canada, 2004, 191 p.

Lemmen, D.S. Warren, F.J. Lacroix, J et E. Bush (éditeurs), *Vivre avec les changements climatiques*: édition 2008, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008.

Gitay, H., S. Brown, W. Easterling, and B. Jallow (2001). Ecosystems and their goods and services. Pages 235–342 in J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, and K.S. White, editors. *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*.

L'Earth Policy Institute (août 2008), en ligne

http://www.earth-policy.org/Indicators/Temp/Temp_data.htm#fig5

Lecocq et Shalizi (2004), World Bank, en ligne
http://www.iiasa.ac.at/Research/ECS/IEW2004/docs/Shalizi_2004IEW.ppt#256,1,Mitigation and Adaptation Some Perspectives

Lemmen, D.S. et F.J. Warren. Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne, Gouvernement du Canada, 2004, 191 p.

Lemmen, D.S. Warren, F.J. Lacroix, J et E. Bush (éditeurs), Vivre avec les changements climatiques: édition 2008, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008.

Lind, Robert C (1995), "Intergenerational equity, discounting, and the role of cost-benefit analysis in evaluating global climate policy," *Energy Policy*, Elsevier, vol. 23(4-5), pages 379-389.

Moore, Mark A. *et al. Just Give Me a Number! Practical Values for the Social Discount Rate*. Simon Fraser University, 2003.

Navrud, S. (2001), "Valuing Health Impacts from Air Pollution in Europe", *Environmental and Resource Economics* 20: 305-329.

Pearce, D. W. and D. Moran (1994), *The Economic Value of Biodiversity*. London: EarthScan.

Perez-Garcia, J. (1995), "Economic Impacts of Climate Change on the Global Forest Sector: An Integrated Ecological/Economic Assessment", conference paper, Bergendal.

Reilly, J. M., N. Hohmann and S. Kane (1994), "Climate Change and Agricultural Trade: Who Benefits, Who Loses?", *Global Environmental Change* 4(1), 24-36.

Rosenzweig, C. and M. L. Parry (1994), "Potential Impact of Climate Change on World Food Supply", *Nature* 367, 133-138.

Séguin, J et P. Berry, *Santé humaine et changements climatiques: Évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada*, Santé Canada, Ottawa, juillet 2008.

Smith, J. and S. Hitz (2003), "Background Paper: Estimating Global Impacts from Climate Change", OECD, Paris, ENV/EPOC/GSP(2002)12/FINAL

Sohngen, B.L., R.O. Mendelsohn, and R.A. Sedjo (2001), "A Global Model of Climate Change Impacts on Timber Markets", *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 26, (2), 326-343.

Tol, R.S.J. (2002a), "New estimates of the damage costs of climate change, Part I: Benchmark estimates", *Environmental and Resource Economics* 21: 47-73.

Tol, R.S.J. (2002b), "New estimates of the damage costs of climate change, Part II: dynamic estimates", *Environmental and Resource Economics*, 21: 135–160. Tol, R.S.J. (2005), "Emission Abatement versus Development as Strategies to Reduce Vulnerability to Climate Change: An Application of *FUND*", *Environment and Development Economics*, 10, 615-629.

Tol, R.S.J. and G.W. Yohe (2006), "A Review of the *Stern Review*", *World Economics*, 7 (3), 233-250. Stern, N., S. Peters, V. Bakhshi, A. Bowen, C. Cameron, S. Catovsky, D. Crane, S.

Tsigas, M. E., G. B. Frisvold and B. Kuhn (1996), "Global Climate Change in Agriculture", in T. W. Hertel, ed., *Global Trade Analysis: Modeling and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.

University of Hamburg (septembre 2008), en ligne
<http://www.mi.uni-hamburg.de/FUND.5679.0.html>

Warren, F.J et P.A Egginton. « Information de base : concepts, aperçus et approches », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S Lemmen, F.J Warren, J Lacroix et E. Bush (éditeurs), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp.27-56

Warren, R., C. Hope, Mastrandrea, M.D., Tol, R., Adger, N. and Lorenzoni, I. (2006) "Spotlighting impacts functions in integrated assessment." Research Report Prepared for the Stern Review on the Economics of Climate Change." Tyndall Centre Working Paper 91.

W.J. McKibbin and P.J. Wilcoxon, Climate policy and uncertainty: the roles of adaptation versus mitigation, *Brookings Discussion Papers in International Economics* 61 (2004), pp. 1–15.

Yohe, G. W. and R. S. J. Tol (2002), "Indicators for Social and Economic Coping Capacity—Moving Towards a Working Definition of Adaptive Capacity", *Global Environmental Change*, 12 (1), 25–40.